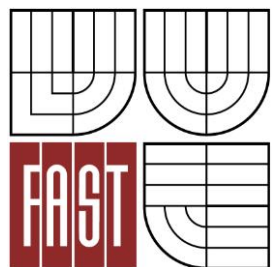




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

ANALÝZA TYPŮ PLNIVA NA VLASTNOSTI DŘEVOPLASTOVÉHO KOMPOZITU

ANALYSIS OF FILLER TYPES ONTO THE WOOD PLASTICS COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ BLAHA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Lukáš Blaha

Název Analýza typů plniva na vlastnosti
dřevoplastového kompozitu

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

**Datum zadání
bakalářské práce** 30. 11. 2015

**Datum odevzdání
bakalářské práce** 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- Klyosov, Anatole A. Wood-Plastic Composites. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007
- Jančář, J. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1.vydání. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003.194 s. ISBN 80-214-2443-5
- Falk, H. Wood recycling: Opportunities for the wood waste resource. Forest Products Journal 6, no. 47 (1997): 17-21
- Morton, J., and L. Rossi. Current and Emerging Applications for Natural and Wood Fiber Composites. 7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites. Madison, WI: Forest Products Society, 2003.
- Yeh, Shu-Kai, Sushant Agarwal, and Rakesh K. Gupta. Wood-plastic composites formulated with virgin and recycled ABS. Composites Science and Technology, no. 69 (2009):2225–2230
- El-Haggar, Salah M. and Kamel, Mokhtar A. (2011). Wood Plastic Composites, Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials, Dr. Pavla Tesinova (Ed.), ISBN: 978-953-307-449-8

Zásady pro vypracování

Bakalářská práce se bude zabývat možnostmi využití recyklovaných či odpadních plastů jako částečné náhrady panenského polymeru pro WPC aplikace. Využitím odpadních plastů se snižuje environmentální zátěž při jejich výrobě, navíc v poslední době jejich využití při výrobě WPC materiálu vykazuje výrazný nárůst. Pro adekvátní výrobu takto plněného WPC polymeru je nezbytné při výrobním procesu zohlednit vlastnosti odpadního polymeru, zejména parametrů mající spojitost s možnou degradací či kontaminací polymerní matrice. Po teoretické stránce budou specifikovány různé typy degradačních procesů plastů. S ohledem na skutečnost, že doposud není přesně popsán mechanismus vlivu odpadního polymeru na výsledné vlastnosti WPC, budou v práci specifikovány vybrané vlastnosti polymeru, které jsou prokazatelně plněním odpadními polymery u WPC materiálu ovlivňovány (reologické, fyzikální či pevnostní parametry). Bude navíc provedena literární rešerše vědeckých prací, na základě kterých budou detailně popsány dosažené závislosti vlivu odpadních polymerů na výsledné vlastnosti WPC směsi. S ohledem na výsledky rešeršních prací bude výsledkem bakalářské práce optimalizace sledovaných parametrů odpadních plastů, jímž bude zajištěno dosažení obdobných parametrů WPC směsí jako v případě směsí mající matrici z panenského polymeru.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Bibliografická citace VŠKP

Lukáš Blaha *Analýza typů plniva na vlastnosti dřevoplastového kompozitu*. Brno, 2016. 64 s., 66 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

Abstrakt

Dřevoplastový kompozit (WPC) je materiál, který spojuje dřevní hmotu a termoplastovou matici. Jako plnivo bude použita dřevitá moučka a jako termoplastová matrice bude použit primární nebo recyklovaný polypropylen. WPC bude vyrobený vstřikováním. Cílem bakalářské práce je najít optimální poměr mezi primárním a recyklovaným polymerem u kterého budou nejlepší výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti.

Klíčová slova

Dřevoplastový kompozit, polypropylen, polyetylen, přísady, plnivo, dřevní moučka

Abstract

Wood polymer composite (WPC) is a material that combines the wood material and the thermoplastic matrix. As filler to be used as wood flour and thermoplastic matrix will be used in primary or recycled polypropylene. WPC will be made by injection molding. The aim of the thesis is to find the optimal ratio between primary and recycled polymer in which the result will be the best physical and mechanical properties.

Keywords

Wood polymer composite, polypropylene, polyethylene, additives, filler, wood flour

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval:

Vedoucímu mojí bakalářské práce **doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D.** za jeho ochotu, trpělivost a odborné vedení

Ing. Anně Benešové za její cenné rady a strávený čas

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21.5.2016

.....
podpis autora
Lukáš Blaha

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21.5.2016

.....
podpis autora
Lukáš Blaha

1	Úvod	10
2	Dřevo-plastový kompozit (WPC).....	12
2.1	Používané polymerní matrice pro WPC.....	12
2.1.1	Polyolefiny.....	12
2.2	Polyvinylchlorid (PVC)	15
2.3	Plnivo	16
2.3.1	Dřevní hmota	16
2.4	Přísady	17
2.4.1	Kompatibilizéry	19
2.4.2	Maziva	19
2.4.3	Barevné pigmenty	19
2.4.4	Retardéry hoření pro WPC	20
2.4.5	Stabilizátory.....	21
3	Výroba WPC	23
3.1	Skladování a transport dřevní hmoty	23
3.2	Homogenizace směsi.....	24
3.3	Vytlačování.....	26
3.4	Výroba WPC produktů vstřikováním	27
4	Modifikace WPC odpadními produkty.....	29
4.1	Modifikace matrice – odpadními polyolefiny	29
5	Sledované parametry recyklovaných polymerů pro jejich zpětné využití.....	31
5.1	Vliv bodu tání	31
5.2	Vliv nemísitelnosti.....	32
5.3	Vliv reologie	33
5.4	Vliv síťování.....	34
5.5	Vliv krystalinity	36
5.6	Vliv polarity.....	36

6	Cíl práce	38
7	Rešeršní část - vliv plnění recyklovaných a odpadních polymerů na vlastnosti WPC	39
7.1	Vliv na pevnostní charakteristiky	39
7.2	Vliv na hygroskopické vlastnosti WPC	40
7.3	Vliv na rázovou houževnatost WPC	42
8	Experimentální část	43
8.1	Výrobní proces	43
8.2	Použité suroviny	43
8.3	Výroba WPC	45
8.4	Receptury.....	46
8.5	Zkušební metody	47
8.5.1	Pevnost v tahu	47
8.5.2	Měření indexu toku taveniny (ITT).....	47
8.5.3	Diferenciální snímací kalorimetrie.....	47
9	Výsledky zkoušek.....	49
9.1	Pevnost v tahu.....	49
9.2	Měření indexu toku taveniny (ITT)	49
9.3	Stanovení diferenční snímací kalorimetrie (DSC).....	50
9.4	Vyhodnocení výsledků a diskuze	50
9.4.1	Pevnost v tahu	50
9.4.2	Index toku taveniny	53
9.4.3	Diferenční snímací kalorimetrie	53
10	Závěr	54
11	Literatura.....	56

1 Úvod

Dřevo-plastové kompozity (dále jen WPC) jsou v dnešní době stále častěji uplatňované materiály. Od jejich první aplikace v devadesátých letech minulého století zaznamenaly velký pokrok. WPC je kompozitní materiál tvořený dvěma a více složkami s rozdílnými vlastnostmi, jak negativními tak pozitivními. Kombinací těchto složek je připraven kompozit s fyzikálními a mechanickými synergicky zlepšenými vlastnostmi v porovnání s vlastnostmi vstupních surovin. Hlavní částí WPC tvoří plnivo - dřevní hmota (40 - 70 %) a matrice, obvykle termoplastová. Nejčastěji se uplatňují matrice z polypropylenu (PP) a vysokohustotního polyetyleny (HDPE). Objemový podíl termoplastů se pohybuje v rozmezí 30 – 60 %. Čím více použijeme dřevní hmoty, tím více působí výsledný produkt přírodním dojmem.

Další nedílnou součástí WPC kompozitů jsou přísady, které se podílejí na zlepšení výsledných vlastností a usnadnění výroby. V konečné hmotě kompozitu se zpravidla nachází kompatibilizéry, různé funkční stabilizátory, maziva, barevné pigmenty a retardéry hoření. Hlavní myšlenkou přípravy WPC bylo vytvořit materiál dosahující nejlepších vlastností obou hlavních složek (dřevní hmoty a termoplastové matrice) a případně eliminovat nežádoucí environmentální účinky na organické dřevo, jako jsou procesy tlení, možnost napadení biotickými škůdci, sesychání, nižší odolnost proti UV záření. Negativními vlastnostmi plastů jsou degradace (změna vlastností polymerů štěpením polymerních řetězců na kratší řetězce), omezená odolnost proti chemikáliím a hořlavost. Spojením dřevní hmoty a polymerní matrice se získá materiál, který je sensoricky příbuzný dřevu bez jeho negativ při aplikaci v exteriéru. V dnešní době se WPC materiály používají jak pro exteriér (terasy, střechy, ploty apod.), tak pro interiér (schodiště, nábytek, rámy oken a dveří).

Obsah předkládané bakalářské práce se tematicky zaměřuje na možnosti využití odpadních materiálů při výrobě WPC. Práce je rozdělena do teoretické a praktické části. Teoretická část tvoří znalostní bázi popisující WPC jako materiál, působení jednotlivých složek a výrobní postupy zejména s ohledem na klasické komerční WPC vyrobeno z primárního polymeru a dřevité moučky vylepšené požadovaným podílem aditiv. Na definici základních znalostí pak navazuje teoretická řešerše odborných článků, shrnující znalosti popsané v odborných člancích studujících řešenou tematiku,

tedy uplatnění různých typů recyklovaných polymerů (regranulátu) v termoplastové matrici.

Praktická část bakalářské práce hodnotí vliv příměsi recyklovaného polymeru do termoplastové matrice. Vliv částečné náhrady primární matrice stejnodruhovým polymerním regranulátem je ověřena praktickým experimentem. Na základě provedených pevnostních a technologických zkoušek bude stanoven optimální podíl recyklovaného polymeru pro výrobu WPC kompozitu, aniž by došlo k významným poklesům sledovaných parametrů.

2 Dřevo-plastový kompozit (WPC)

Dřevo-plastový kompozit je materiál spojující dřevní hmotu (nejčastěji piliny nebo dřevitou moučku) a termoplastovou matici. Produkty z tohoto materiálu se uplatňují při produkci tzv. *deckingu*, tedy plošných podlahových nebo obkladových prvků, jako alternativa pro masivní dřevo v exteriéru. Nejčastěji se s nimi lze setkat v podobě terasových systémů či obkladů vnějších stěn. Dřevo-plastový kompozit se skládá z dřevní hmoty a termoplastové matrice tvořené nosným polymerem, plniva (dřevitá moučka) a z přísad. Podíl termoplastové matrice se pohybuje v rozmezí 30 - 50 %. [1]

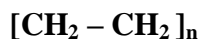
2.1 Používané polymerní matrice pro WPC

Termoplastová matrice WPC je obvykle tvořena polypropylenem (PP), polyetylenem (PE), polystyrenem (PS), polykarbonátem (PC) a dalšími polymery. Podrobnější popis nejčastěji užívaných termoplastových matic je uveden v následujících podkapitolách. [35]

2.1.1 Polyolefiny

Polyolefiny jsou polymery, které lze rozdělit na homopolymery a kopolymery olefinů nebo alkenů, tj. uhlovodíků, které obsahují ve svých molekulách dvojnou vazbu. K nejdůležitějším patří homopolymery a kopolymery etylenu a propylenu a homopolymer 1-butenu. Nejvýznamnějšími deriváty polyolefinů jsou fluoroplasty, tj. polymery olefinů, v jejichž molekulách byly vodíkové atomy nahrazeny fluorovými buď úplně, nebo jen částečně. Zbývající vodíkové atomy jsou eventuálně nahrazeny atomy chloru. Pro aplikaci se formě termoplastové matrice WPC se nejčastěji užívají následující polyolefiny: [35]

a) Polyetylen (PE)



Polyetylen je označován jako homopolymer etylenu (jedná se o základní strukturu). Vlastnosti PE jsou výrazně závislé na molekulové hmotnosti, stupni krystalinity a prostorovém uspořádání makromolekul v řetězci. Polyetylen se používá pro výrobu obalových materiálů, folií, trubek, kanystrů a výrobků pro domácnost. [35]

První zmínka o přípravě vysokomolekulárním homopolymeru etylenu byla zaznamenána již v roce 1935. Polymerace etylenu probíhala při tlaku 100 až 400 MPa, při teplotě od 150 do 400 °C. V dnešní době se používá beztlaková polymerace etylenu za použití katalyzátorů připravených z alkylderivátů hliníku a chloridu titaničitého. Z takto vzniklé polymerace se získávají lineární polymery. [35]

Původně se dělily polymery na nízkotlaké a vysokotlaké, ale podařilo se připravit polymery s vlastnostmi původních nízkotlakých i za vysokého tlaku a naopak. Z důvodu nepřesného rozdělení polymerů se začaly klasifikovat dle hustoty. Hustota polymerů je mírou linearit řetězců makromolekul a také krystalinity polymeru. Hustota polypropyleny a polyetyleny se mění postupně

Rozlišují se dva základní typy polyetyleny: [35]

- a) lineární – vysokohustotní polyetylen (PE – HD),
- b) rozvětvený – nízkohustotní polyetylen (PE – LD).

S postupně se zvyšující krystalinitou (krystalinita je schopnost dosáhnout určitého stupně uspořádanosti a vykazovat určitou molekulární strukturu) se zvyšuje chemická odolnost polymerů. Při běžných pokojových teplotách odolává polyetylen vodě, kyselinám, zásadám a solím, jejich roztokům a polárním rozpouštědlům. Za zvýšené teploty se polyetyleny rozpouští i v polárních rozpouštědlech, například v benzenu a toluenu. Ovšem u nepolárních rozpouštědel je za běžných a zvýšených teplot chemická odolnost značně omezená. Nepolární rozpouštědla jsou chemické látky, které primárně slouží k rozpouštění nepolárních sloučenin. Mezi nepolární rozpouštědla lze zařadit benzen (C_6H_6) a tetrachlormethan (CCl_4). [35]

Tabulka 1 - Charakteristické vlastnosti polyetyleny [35]

Polyetylen	Vlastnost			
	Hustota [kg.m ⁻³]	Krystalinita [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]
Lineární	> 960	> 93	> 25	> 1000
Rozvětvený	> 930	> 64	> 10	> 1000

Polyetylen je odolný od nízkých teplot – 120 °C, kdy začíná křehnout. Tvarově stálý je až do teploty 90 °C. [35]

Kopolymery etylenu

Kopolymer je polymer, jehož makromolekula se skládá z nejméně dvou druhů monomerů s různým uspořádáním. Kopolymery etylenu se připravují z následujících monomerů: [35]

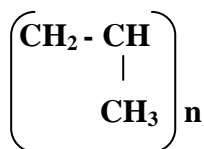
- a) kopolymer etylenu s vinylacetátem - používá jako modifikátor vlastností rozvětveného polyethylenu (PE), polypropylenu (PP) a polyvinylchloridu (PVC) kterým se zvyšuje rázová houževnatost,
- b) kopolymery etylenu s vinylkarboxylovými kyselinami - k výrobě se používá kyselina metakrylová. Karboxylové skupiny jsou převedeny na soli kovů označovaných jako ionomery. Použitím kovových iontů se získá houževnatý, elastický a málo rozpustný materiál. Tento materiál má vlastnosti jako termoplast, který může být znovu tvářen.

Tabulka 2 - Charakteristické vlastnosti ionomeru [35]

Typ použití	Vlastnost				
	Hustota [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu [kg.m ⁻³]	Tažnost [%]	Houževnatost [KJ.m ⁻²]	Navlhavost [hmot. %]
Fólie	940	350	540	740	1,4
Lisované výrobky	940	28	450	850	1,4
Elektrotechnické výrobky	960	35	40	360	0,1

Mezi další zástupce patří kopolymery etylenu s akrylovou kyselinou a kopolymery etylenu s propylenem.

b) Polypropylen (PP)



Polypropylen má nepolární strukturu podobnou polyetyleny. Jednou ze základních vlastností polypropylenu je jeho průhlednost a to z důvodu nižšího stupně krystalinity, která dosahuje 60 – 75 %. [35]

Vysokomolekulární krystalický izotaktický polypropylen vzniká za přítomnosti katalyzátorů z monomeru (propylenu). Izotaktický polypropylen má nízkou hustotu a

bod tání v rozmezí 160 až 170 °C. Vyznačuje se menší odolností proti mrazu, povětrnosti a také oxidací v porovnání s polyetylenem. Mezi nesporné výhody polypropylenu patří tyto vlastnosti: vyšší pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti otěru. Ve srovnání s polyetylenem, disponuje polypropylen větší chemickou odolností při vyšších teplotách [35].

Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti polypropylenu [35]

Vlastnost	Hustota [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Houževnatost [kg.m ⁻²]	Navlhavost [%]
Hodnoty	900 - 910	22 - 32	120 - 700	10 - 15	0,1

Polypropylen se zpracovává vstřikováním a vyfukováním na menší duté předměty. Nejčastějšími produkty jsou desky, profily, fólie. Kromě toho je možné desky lisovat z granulí. Z důvodů lepších mechanických vlastností se polypropylen používá na součástky strojů v automobilovém a spotřebním průmyslu. Dalšími aplikacemi jsou produkty pro domácnosti jako desky kuchyňských linek, izolace elektrických kabelů, výroba lan a provazů nebo k výrobě chemicky i mechanicky odolných vláken. [35]

2.2 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid a polypropylen jsou nejznámější a nejvíce průmyslově vyráběné polymery. Výhodou polyvinylchloridu je jeho levná výroba a dobrá zpracovatelnost. Výroba PVC může probíhat vytlačováním, vstřikováním, válcováním, vakuovým tvarováním atd. [35].

PVC se průmyslově vyrábí prostřednictvím následujících technologií: [35]

- suspenzí, jedná se o nejpoužívanější způsob výroby,
- blokovou polymerací, přičemž výsledkem je velmi čistý polyvinylchloridový prášek,
- emulzí.

Výsledkem průmyslového zpracování je vysoce porézní prášek, z důvodů nerozpustnosti polyvinylchloridu v monomeru. Polyvinylchlorid se následně zpracovává na dva druhy polymerů: [35]

- neměkčený PVC (obchodní název Novodur) se zpracovává bez změkčovadel. Při výrobě se užívají pouze stabilizátory, maziva a modifikátory. Produkty jsou

tvrdé výrobky (jako trubky, desky apod.). Novodur je pevný plast, ale bohužel křehký a použitelný přibližně do teplot 60 °C. Při překročení teploty 80 °C měkne a přechází do plastického stavu,

- b) měkčený PVC (obchodní název Novoplast) se zpracovává se změkčovadly, stabilizátory, mazivem a modifikátory, přičemž vyrobené prvky jsou tuhé až elastické (fólie, nádoby, ochranné rukavice apod.). Novoplast je ohebnější než novodur a při teplotách pod bodem mrazu křehne.

Polyvinylchlorid je odolný vůči zásadám, neoxidujícím kyselinám, uhlovodíkům a alkoholům. V ketonech, chlorovaných a aromatických rozpouštědlech bobtná. Se vzrůstající teplotou a stupněm změkčení roste jeho rozpustnost v cyklohexanonu a tetrahydrofuranu. PVC je hydrofobní, při běžné teplotě má schopnost pohltit přibližně 1 % vlhkosti. Velkou výhodou polyvinylchloridu je jeho vysoká pevnost v tahu a také je oceňována jeho odolnost vůči ohni, protože velmi špatně hoří. [35]

2.3 Plnivo

Dřevní hmota je použita jako primární plnivo dřevo-plastového kompozitu. Dřevní hmota je vláknitý materiál přírodního původu. Dále se používají příměsi na zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností. Jako příměs lze použít popílek nebo mastek. Dřevní hmota je přírodní materiál z různých typů dřevních vláken, proměnlivými vlastnostmi, zejména ve spojení s obsahem vlhkosti. Než proběhne homogenizace dřevní hmoty a polymerní matrice, je důležité definovat jejich vlastnosti. [1]

2.3.1 Dřevní hmota

Dřevní hmota je jedna ze složek dřevo-plastového kompozitu sloužící jako plnivo. Dřevní hmota se dělí dle velikosti částic na dřevitou moučku, piliny nebo štěpky. Výhody dřeva jsou jeho obnovitelnost, zpracovatelnost a vhodné mechanické vlastnosti. Mezi hlavní charakteristiky dřeva lze označit jeho nasákavost, která ovlivňuje objemové změny dřeva, a výrazně na její hodnotě závisí mechanické vlastnosti dřeva. Kromě nasákavosti dřeva lze za další významné nevýhody označit napadení biotickými škůdci. [1]

Vlastnosti a příprava vstupních materiálů na výrobu WPC

Velmi důležitým parametrem z hlediska výběru vhodné výrobní technologie WPC je velikost částic, na které se zpracovává dřevní hmota. Dřevní hmota se zpracovává na různou velikost částic od velikosti dřevité moučky, pilin až po velikosti štěrky. U dřevité moučky je nutné sledovat zejména specifickou objemovou hmotnost, tvar a velikost částic, pružnost částic a tření částic. [1]

Dřevitá moučka

Při výrobě dřevité moučky se ve středoevropském regionu nejčastěji užívá smrk. Dřevitá moučka se získává jako vedlejší produkt ve dřevozpracujícím průmyslu, který zahrnuje lesní těžbu, stavebně-truhlářské závody, pilařské závody, nebo se cíleně vyrábí souběžně při procesu výroby samotného WPC kompozitu. Zpracováním dřevité moučky za zvýšené teploty a vysokého tlaku se získá dřevitá moučka o objemové hmotnosti o hodnotě přibližně 1300 kg.m^{-3} . V závislosti na konkrétních vlastnostech a dodavateli se však může od této hodnoty mírně odchylovat. [1, 37]

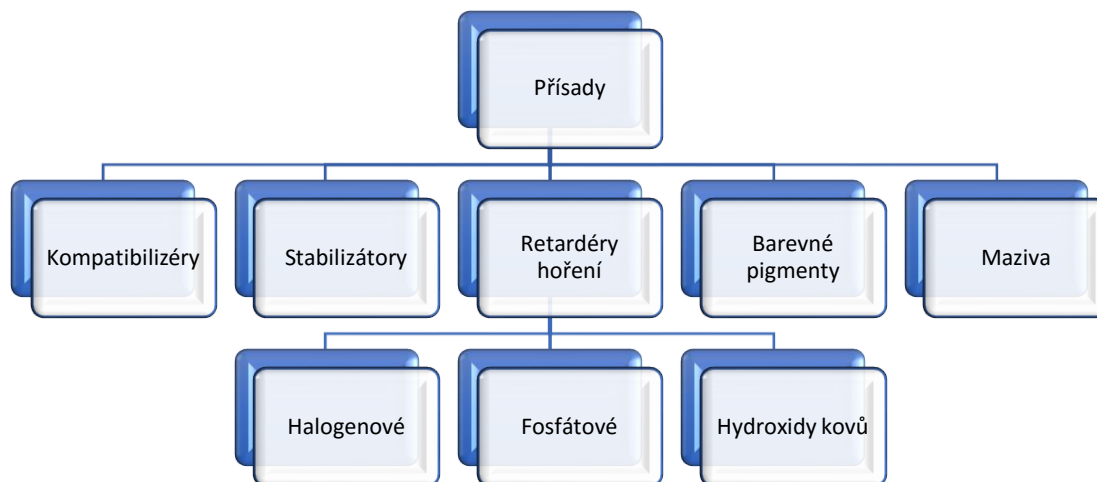
Tabulka 4 - Vlastnosti a parametry dřevitá moučky určené k výrobě WPC [37]

Vlastnosti	Hustota [kg.m^{-3}]	Rozměry [μm]	Poměr délky/ poměr tloušťky	Vlhkost [%]
Hodnoty	190 - 220	50 - 150; 100 – 200; 200 – 450; 250 - 700	2:1 – 5:1	4 - 8

2.4 Přísady

Přísady jsou látky vylepšující mechanické, fyzikální a estetické vlastnosti kompozitů. U WPC kompozitů se uplatňují především s ohledem na požadované vlastnosti polymerní matrice. Objemový resp. hmotnostní podíl obsahu přísad se stanovuje v závislosti na objemu (hmotnosti) matrice, obvykle se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 5 % hmotnosti pojiva. Aditiva lze rozdělit do dvou kategorií, a to na: [1, 36]

- přísady modifikující fyzikální a mechanické vlastnosti polymerů,
- na přísady s ochranným účinkem proti degradaci.



Obrázek 1 - Schéma rozdělení přísad používaných u WPC

WPC je možné upravovat přidáním přísad, které se podílejí na jeho ochraně a zvyšují jeho parametry, např. odolnost proti biotickým škůdcům. Na WPC tak není nutné provádět výraznou pravidelnou údržbu ošetřováním a nátěry, jako je tomu u rostlého dřeva. Dle požadovaných vlastností jsou přísady rozlišovány na kompatibilizéry, stabilizátory, retardéry hoření, antioxidanty, UV stabilizátory, změkčovadla a plastifikátory, pigmenty. Přísady, které nevyztužují matrici, jsou: [1, 36]

- kompatibilizéry - zlepšují přilnavost obou hlavních vstupních surovin (dřevitá hmota a termoplastická matrice),
- stabilizátory - které jsou schopny zpomalit degradační procesy a zvyšují životnost polymeru. Dělí se na tepelné a světelné,
- retardéry hoření - zabraňující zapálení polymeru nebo zpomalující proces hoření,
- barevné pigmenty - barevné pigmenty založené na organických sloučeninách kovů, nejčastěji se jedná o oxidy železa, které dodají polymerům požadované zbarvení, obsah barviv se zde pohybuje v rozmezí do 10 %,
- maziva - zlepšují zpracovatelnost polymerů, tím že sníží nalepování výrobku na stěnu formy nebo sníží viskozitu polymeru,
- další.

2.4.1 Kompatibilizéry

Kompatibilizéry zlepšují přilnavost mezi plnivem a matricí. V dnešní době se používá jako kompatibilizér modifikovaný jíl a roubovaný polypropylen. Přilnavost je povrchový elektrostatický jev na rozhraní dvou materiálů. Molekuly na povrchu plniva a matrice se liší v polaritě. Použitím kompatibilizační přísady vznikne mezičlánek mezi plnivem a matricí a zvýší se přilnavost. Kromě zvýšení přilnavosti se také zlepši mechanické vlastnosti materiálu. Udává se pro WPC s polypropylenovou matricí, že se pevnost v tahu se zvýší až o 12 %, pevnost v tahu za ohybu až o 15 %. Dávkování kompatibilizéru je v rozmezí od 2 do 5 % hmotnosti pojiva. [1]

2.4.2 Maziva

Maziva jsou přísady, které ulehčují zpracování a snížení viskozity polymerů. Dále zlepšují odolnost proti povětrnostním vlivům nebo tepelnou a světelnou stabilitu. Maziva se dělí podle způsobů účinků, a to na: [1,40]

- a) maziva s vnějším účinkem - jedná se o látky, které se rozpouštějí v polymeru. Na povrchu polymeru tvoří ochrannou vrstvu, která se podílí na snazším oddělení výrobku od formy. Mezi maziva s vnějším účinkem lze zařadit mastné kyseliny (amidy a estery),
- b) maziva s vnitřním účinkem - látky, které se velmi dobře rozpouští v polymeru, snižují viskozitu taveniny. Tento typ maziv také snižuje množství tepla, které vzniká třením při výrobě polymerních směsí. Zástupci tohoto typu maziv jsou těžké alkoholy.

2.4.3 Barevné pigmenty

Barevné pigmenty jsou práškové barvy, které nejsou rozpustné v polymerech. Rozhodující vlastnostmi pigmentů jsou tepelná stálost na světle a kvalita barevného odstínu. Barevné pigmentu se dělí dle báze na: [40]

- a) organické pigmenty – všechny organické pigmenty jsou syntetické. Při použití organických pigmentů se používá jako podklad bílá barva (titanová běloba) v koncentraci 10 %, optimální koncentrace barevného pigmentu je od 0,5 do 2 dílů na 100 hmotnostních dílů polymerů
- b) anorganické pigmenty, jejich zbarvení je méně výrazné. Velmi dobře reagují na podmínky při zpracování. Zástupci jsou křída, grafit nebo sádrovec,

c) práškové kovy, bronzy.

2.4.4 Retardéry hoření pro WPC

Retardéry hoření (dále jen RH) jsou velmi důležité přísady u WPC, protože zabráňují šíření požárů. RH umožňují polymerům zpomalovat hoření po zapálení, ale také omezení vzniku toxických zplodin a kouře při hoření materiálu. [1]

V závislosti na chemickém složení a určené aplikaci lze mezi nejčastější typy retardérů hoření: [1]

- s halogenovou bází,
- fosfátovou bází,
- na bázi hydroxidů kovů.

Halogenové retardéry hoření

Nejvíce používané retardéry hoření jsou založené na principu štěpení vazby mezi uhlíkem a halogenem. Nejběžnější halogenové sloučeniny aplikované jako retardéry hoření jsou bromové nebo chlorované sloučeniny. Sloučeniny fluoru a jódu se kvůli nedostatečné tepelné stabilitě uplatňují velmi zřídka. Účinnost halogenů lze zvýšit v kombinaci s tzv. synergitem (synergit zamezí přístupu kyslíku k plamenu a tím dojde k uhašení ohně). Nejběžnější synergitem je oxid antimonitý Sb_2O_3 . [1, 35]

Fosfátové retardéry hoření

Fosfátové složky působí u retardérů hoření jako přepážky. Po jejich vypálení vzniká nepropustná vrstva zamezující přístupu kyslíku z atmosféry (který podporuje hoření) a chráněný materiál přestává být zápalný. Většinu fosfátových retardérů hoření tvoří látky na bázi kapalných esterů, které jsou nejvhodnější pro PVC, gumy a latexové matrice. Mezi fosfátové RH patří například polyfosforečnan amonný, který v důsledku hoření napění a tím zamezí přístupu kyslíku. [1, 35]

Retardéry na bázi hydroxidů kovů

Hydroxidy kovů jsou anorganického původu, které jsou hojně rozšířené zejména z důvodů nízké toxicity a objemu emisí při spalování polymerů. Za současného působení vody a ohně se při charakteristické teplotě začnou hydroxidy kovů rozkládat. Při hoření vzniká tepelná energie, kterou hydroxidy kovů odráží. Následně se tepelná energie použije na uhašení ohně a probíhá retardace plamene. [1]

Retardéry hoření na bázi anorganických plniv: [1]

- hydroxid hlinitý - používá se u polymerů zpracovávaných do 200 °C,
- hydroxid horečnatý - použití u polymerů zpracovávaných až nad 300 °C.

Polymery, které obsahují retardéry hoření, se označují jako polymery samozhášivé nebo se sníženou hořlavostí. Princip integrace retardérů hoření může být technologicky proveden dvěma způsoby, a to: [1]

- modifikací polymery ve hmotě s použitím reaktivních nebo aditivních retardérů,
- úpravou povrchu nátěrem s retardačními účinky.

2.4.5 Stabilizátory

Stabilizátory jsou přísady se specifickou funkcí, která může být zaměřená na eliminaci účinků oxidace, řetězového štěpení, zabránění nekontrolovaným reakcím a zesíťování (např. při foto-oxidaci polymerů). Stabilizátory minimalizují vliv působících vnějších vlivů a zpomalují degradaci polymerů. Mohou být aplikovány jednotlivě, většinou se však užívají v kombinaci zesilující stabilizační účinek. Stabilizátory se dělí na antioxidanty a UV stabilizátory. [1]

Antioxidanty

Antioxidanty jsou látky, které zpomalují tepelně-oxidační stárnutí. Přidáním antioxidantů se zamezí poškození polymerů při vysokých teplotách na přímém slunci, snižuje se působení vzdušného kyslíku, vody, znečišťujících látek a dalších prvků. Vzdušný kyslík způsobuje degradaci polymerů, která se projeví při běžné teplotě za deset a více let. Při zvýšené teplotě se proces degradace výrazně zrychlí, hovoříme o tzv. oxidačním stárnutí. [35]

Antioxidanty se dělí dle vlivu nabarvení na následující produkty: [35]

- a) nebarvící – výsledné produkty jsou bezbarvé. Mezi nebarvící antioxidanty patří substituované fenoly, resp. kesoly (např. adukt fenolu se styrenem), většina deaktivátorů hydroperoxidů a některé antidegradanty mající obě funkce (2-merkaptobenzoimidazol).
- b) barvící – antioxidanty zbarvující výsledný polymer, ale ne materiál, se kterým přijde polymer do styku. Zástupci barvících antioxidantů jsou především kondenzační produkty aminů (např. difenylamin s ketony).

- c) zbarvující – patří k nejučinnějším antioxidantům, které zbarvují nejen polymer, ale ostatní látky s kterými přijde polymer do styku (výsledný produkt). Nejvíce používanými antioxidanty jsou kaučukové směsi plněné sazemí nebo fenyl-2 naftylamin.

UV stabilizátory

UV stabilizátory slouží k blokování UV záření, které iniciují chemické reakce způsobující degradaci polymeru. Účinek energie UV záření při dopadu na produkt ve venkovním uložení je dále podpořen současným působením kyslíku a vody. Podstatou stabilizačních přísad je zabránit degradaci vlivem těchto faktorů a to na principu: [1]

- a) blokování UV energie - vytvořením blokační vrstvy oxidu (např. oxidu titaničitého), gumárenských sazí nebo pigmentů,
- b) absorbcí UV záření – pro absorpci se používají buď benzofenony nebo benzotriazoly,
- c) UV stabilizací - použitím aminových světelných stabilizátorů (HALS - *Hindered Amine Light Stabilizers*). HALS jsou buď formou monomerů, nebo polymerů.

WPC obsahuje velký podíl dřevního vlákna, které také podléhá degradaci UV zářením. UV záření vyvolává foto-oxidaci ligninu. Foto-oxidace ligninu se projeví nažloutlými a nahnědlými změnami a následným popraskáním povrchu. Proto je důležité chránit i dřevní složku WPC, např. nátěrovými akrylátovými hmotami. [1, 38]

3 Výroba WPC

Dřevní hmota a polymery jsou velmi používané materiály, které mají své výhody i nevýhody. Mezi výhody patří hlavně: trvanlivost, mechanické vlastnosti, tepelný odpor a jejich dobrá dostupnost. Výroba WPC je několikastupňová, jednotlivé složky se musí nejdříve dostatečně smísit – homogenizovat, a poté se příslušnou technologií tvarují do konečného produktu. Postup výroby je znázorněný na následujícím obrázku (Obrázek 1) [1]



Obrázek 2 - Schematický diagram postupu výroby WPC [1]

3.1 Skladování a transport dřevní hmoty

Dřevní hmotu je možno skladovat do pytlů, kartonů, big-begů a sil. Sypký materiál (dřevní hmota) je označován jako výbušný materiál. Během jeho přepravy je nutno vše dostatečně zajistit, v opačném případě může dojít k jiskření, protože prachové částice dřevní hmoty jsou snadno zápalné. [1]

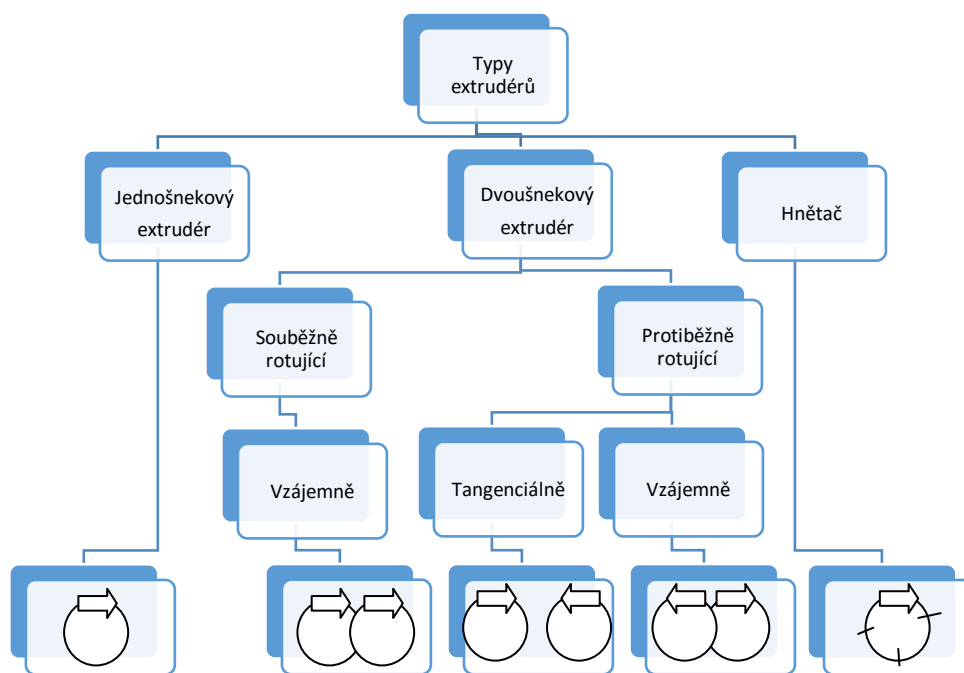
Přeprava dřevní hmoty v areálu podniku může být uskutečněna prostřednictvím: [1]

- šnekových dopravníků – jedná se o nejpoužívanější způsob dopravy. Materiál je dopravován buď pomocí jednošnekových (pro poléťavý materiál) nebo dvoušnekových dopravníků (pro práškový materiál). Dopravníky jsou limitovány objemovou hmotností od 0,1 do 0,2 kg.l⁻¹,
- pásových dopravníků - přeprava materiálu pomocí pásu funguje na následujícím principu: pokud je pás zatížený více, rychlost posuvu pásu se zpomalí. Pokud dopravník není tak zatížený, posuv pásu se zrychlí.
- pneumatických dopravníků - přeprava probíhá pomocí kompresorů, které vhání vzduch do potrubí a tím je materiál unášen,
- vibračních dopravníků – ty jsou přednostně používány pro velmi jemný či pro brusný materiál.

3.2 Homogenizace směsi

Homogenizace se provádí extruzí na šnekovém extrudéru. Vhodný typ extrudéru se uplatní dle způsobu aplikace. Homogenizací se docílí smíchání všech vstupních surovin ve výrobním procesu. Proces probíhá za smíchání dřevité moučky, polymerů a přísad. Směs se primárně zpracuje na homogenizovaný granulát, který pokračuje do dalšího stupně výroby. Výběr vhodného způsobu výroby je určena typem konečného produktu. Pokud je požadováno přesné vytlačování profilů, použije se jednošnekový nebo protiběžný dvoušnekový extrudér. Je-li požadováno dobré pomletí surovin a vytěsnění vzduchu, využije se souběžný dvoušnekový extrudér. [1]

V současné době existuje mnoho různých způsobů homogenizace WPC. Princip strojů pochází z výroby polymerů, kde také dochází k vytlačování směsi. Používané systémy extrudérů při výrobě dřevo-plastových kompozitů jsou znázorněny na následujícím obrázku.



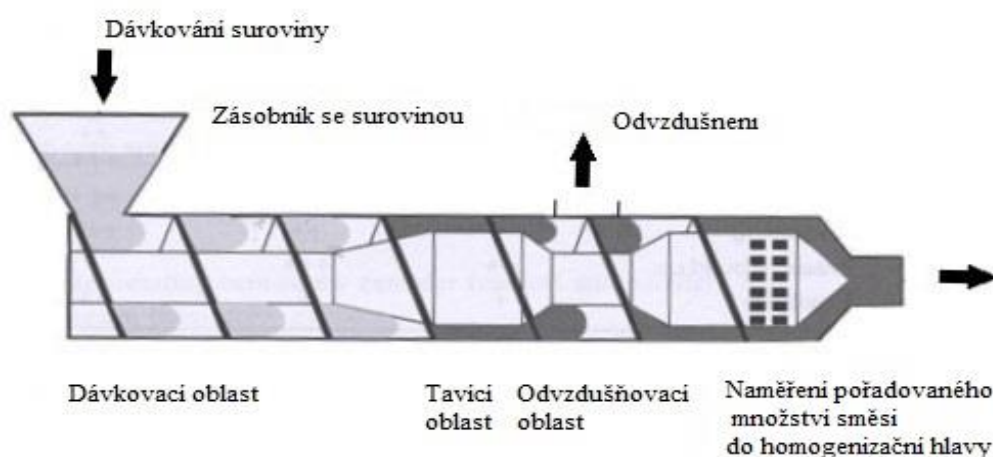
Obrázek 3 - Rozdělení jednotlivých používaných extrudérů [1]

Typy používaných extrudérů: [1]

- protiběžné dvoušnekové,
- souběžné dvoušnekové,
- jednošnekový,
- planetární válcový extrudér.

Jednošnekové a protiběžné dvoušnekové extrudéry

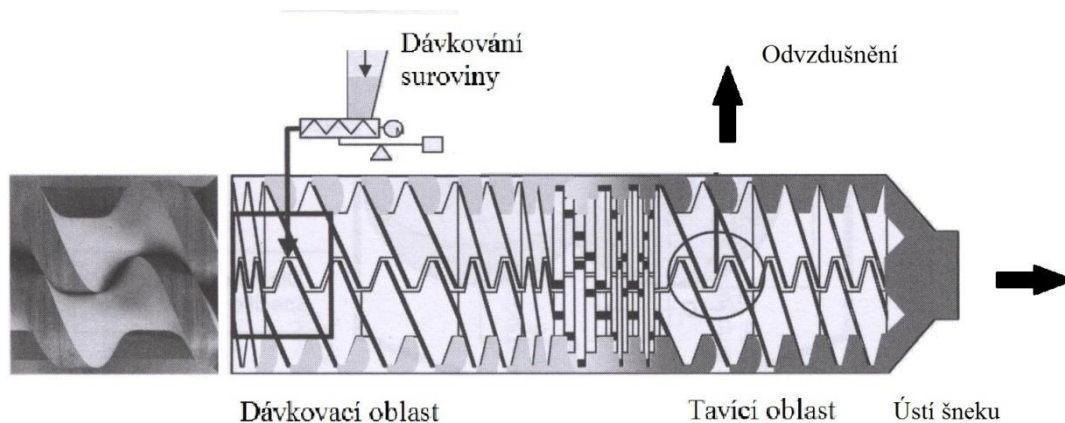
Jednošnekový extrudér je obecně používán pro mnoho aplikací, jako je vytlačování různých typů profilů, rour, fólií či tavení na vstřikovacích lisech. Vstupní surovina je přímo odebírána z násypky bez použití vnější síly. Výstupní rychlost je řízena otáčkami šnekového extrudéru. Výhoda u tohoto extrudéru je jeho univerzální použití, velká životnost a vysoký výkon. Proces výroby je znázorněn na následujícím obrázku. [1]



Obrázek 4 - Schéma jednošnekového a protiběžného dvoušnekového extrudéru [1]

Souběžný dvoušnekový extrudér

Souběžný dvoušnekový extrudér je celosvětově nejčastěji používán v plastikářském průmyslu a je vhodný pro všechny typy homogenizací. První koncept stroje byl vyroben firmou Coperion Werner & Pfleiderer v roce 1953 a pojmenovaný ZSK (*Zwei Schnecken Knetter*). V dnešní době se tyto stroje používají v různých velikostech od malých laboratorních extrudérů až po masivní stroje, které zpracují až 100 tun polyolefinů za hodinu. U tohoto typu extrudéru je možnost automatického dávkování surovin zvolenou rychlostí, která není závislá na otáčkách šneku extrudéru. Dvoušnekový extrudér je výhodný v přeskládání a nastavení šneků dle typu vstupní suroviny. [1]



Obrázek 5 - Schéma dvoušnekového extrudéru [1]

3.3 Vytlačování

Vytlačováním se vyrábí široký sortiment polotovarů. Nejčastěji různé typy desek, profily, dráty a trubky. Jedním ze způsobů může být vytlačování trubek a profilů. Linky na vytlačování trubek a profilů se skládají ze šnekového vytlačovacího stroje, vytlačovací hlavy, kalibrace, chladicí a dochlazovací zóny, odtahovacího zařízení. Běžně se používají jednošnekové vytlačovací stroje. Vytlačovací hlava pro výrobu trubek má na výstupu profil prstence. Vnitřní dutina trubky je vytvářena pomocí jádra. Jádro je jednobodově nebo vícebodově připevněno k tělesu vytlačovací hlavy a uvnitř je proveden přívod pro stlačený vzduch do dutiny vytlačované trubky. Stlačený vzduch zabraňuje zborcení profilu za vytlačovací hlavou (vznikl by podtlak) a zároveň se využívá pro kalibraci. Po vytlačování následuje granulovací zařízení, která zpracovává homogenizovanou směs na granulát postupující do dalšího stupně výroby. [43]

3.4 Výroba WPC produktů vstřikováním

Vstřikování je možno provádět různými technologiemi. Obvykle se využívá jedné ze dvou základních metod uplatňovaných v plastikářském průmyslu. Jedná se o standardní vstřikování předem homogenizovaném granulátu WPC nebo vstřikování v tzv. *in-line* režimu, kdy k homogenizaci surovin a vstřikování směsi dochází v rámci jednoho zařízení nebo výrobní linky. [1]

Standardní vstřikování z granulátu WPC

Stroje pro vstřikování z granulátu WPC jsou obvykle opatřeny jednošnekovými extrudéry. Roztavený granulát je tlačěn přes šnekový extrudér do formy, která je umístěná na konci stroje. Z důvodů odvzdušnění je na jednošnekovém extrudéru potřeba, aby předem připravená WPC směs obsahovala nízký obsah vlhkosti. Aby byl získán co nejkvalitnější WPC produkt, je důležité dodržet následující podmínky: [1]

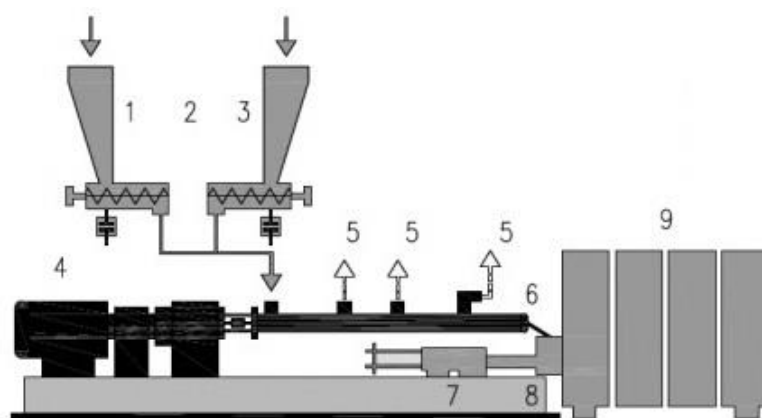
- a) dodržet kvalitu polymeru, charakterizovanou zejména dokonalou homogenizací směsi a výslednou vlhkostí, která musí být pod 0,15 %,
- b) vstřikovací jednotka musí zvládnout odvzdušnění, následně nesmí docházet k přehřívání. Rychlost posunu taveniny se musí přizpůsobit průběhu vstřikování WPC,
- c) vhodný teplotní profil – nastavení teplot na jednotlivých úsecích zařízení musí být adekvátní toku taveniny, což zajistí minimalizaci smykového napětí materiálu,
- d) forma musí obsahovat odvzdušnění a vhodnou geometrii, která ovlivní smykovou rychlost během vstřikování.

In-line vstřikování

In-line vstřikování je technologie výroby produktů z WPC kombinující dvoufázové vstřikování a souběžný dvoušnekový extrudér. Dvoufázové vstřikování je z důvodu zkrácení času výroby stále více používané. [1]

Princip technologie in-line vstřikování je uveden na následujícím obrázku (Obrázek 6) a je založen na souslednosti několika kroků. V prvním kroku jsou polymery, přísady a dřevní hmota dávkovány do dvoušnekového extrudéru. V extrudéru dochází k homogenizaci těchto materiálů a následně k opakovanému odvzdušnění. Homogenizovaný kompozit je po odvzdušnění transportován do snímací nádoby.

Jakmile je snímací nádoba částečně naplněná, homogenizace se zastaví a začíná vstřikování. Tavenina je pomocí trysky hydraulicky vstříknuta do formy. Tyto systémy jsou velmi vhodné pro vstřikování do forem větších jak 1 kg. [1]



Obrázek 6 - Schéma *In-line* výrobní linky pro vstřikování 1. dávkování polymerů; 2. dávkování přísad; 3. dávkování dřevité moučky; 4. dvoušnekový extrudér; 5. Odvzdušnění; 6. Přenosný kanál; 7. Snímací nádoba; 8. Přepínací ventil; 9. Upínací nástroj; [1].

4 Modifikace WPC odpadními produkty

Modifikace WPC se provádí z důvodů využívání materiálů z neobnovitelných zdrojů. Proto je rozsáhlá tendence využívat druhotné suroviny k jeho výrobě. WPC lze pomocí odpadních a druhotných surovin modifikovat dvěma způsoby, jedná se o modifikaci termoplastické matrice recyklovaným polymerem, nebo o modifikaci plniva příměsí anorganické částicové suroviny. Oba typy modifikace sebou přináší své výhody i nevýhody.

Modifikace dřevo-plastového kompozitu s přidavkem anorganického částicového plniva by měla zvýšit zejména tlakovou pevnost a odolnost proti nárazu. Organické ligno-celulózové plnivo plní funkci především vláknové výztuže. Díky výztuži získá materiál vyšší tahovou pevnost oproti neplněnému polymeru.

Modifikace matrice WPC se zaměřuje na uplatnění recyklovaných plastů, jejichž vlastnosti přibližně odpovídají užitým primárním polymerům. V následujících podkapitolách je provedena rešerše odborných studií zabývajících se právě tematikou náhrady části polymerní matrice zpracovanými odpadními plasty.

4.1 Modifikace matrice odpadními polyolefiny

Při použití recyklovaných plastických hmot ve výrobě WPC, je třeba v první řadě dobře pochopit elementární strukturu těchto materiálů. Znalost vlastností recyklovaného polymeru a detailní přehled o postupech a parametrech výroby dřevo-plastového kompozitu (WPC) umožňují adekvátně nastavit a lépe kontrolovat technologické procesy, a zároveň optimalizovat vyráběné produkty.

Polymery pro recyklaci se získávají z různých zdrojů a způsob jejich primárního použití výrazně ovlivňuje nejen složení přísad, ale i chemickou strukturu samotného polymeru a proto je důležité znát vlastnosti před samotným použitím kvůli deklaraci jakosti. Recyklovaný polymer je možno získat z různých zdrojů. Tyto zdroje mohou být různého původu, zpracování a skladování. Takto získané polymery mohou vykazovat rozdílnou úroveň kvality s ohledem na jejich další zpracování. Spotřebitelský plastový odpad je jedním z nejdůležitějších zdrojů recyklátu. Variabilita odpadu však způsobuje vysoký nežádoucích barviv a nečistot.

Jedním z hlavních faktorů ovlivňující použitelnost recyklátu je stupeň degradace recyklovaného polymerů. Dle převažujícího působení lze rozlišit následující typy degradujících faktorů:

- termální,
- chemické,
- mechanické,
- biologické.

Obvykle při degradaci převažuje jeden z faktorů, téměř vždy se však vyskytuje jejich kombinace. Nejčastěji se jedná o kombinaci působení termo-oxidační, nebo termo-mechanické degradace. Degradace se zpravidla projevuje odbarvením polymerní matrice, ztrátou těkavých složek příp. ztrátou mechanických vlastností. I když jsou v některých případech vlastnosti recyklovaného polymeru podobné primárnímu polymeru, většinou se velmi odlišují. Znalost vlastností plastové matrice je velmi důležitá pro nastavené výrobní technologie, jelikož vlastnosti odpadních polymerů a primárních polymerů nejsou stejné.

5 Sledované parametry recyklovaných polymerů pro jejich zpětné využití

Recyklace polymerů se skládá z několika navazujících fází zahrnující rozdělení plastových odpadů, odstranění nečistot, rozmělnění a mačkání pro zmenšení velikosti částic, protlačení za tepla a vytvoření nového produktu. Recyklace odpadních polymerů mohou probíhat následujícími způsoby: [40, 46]

- a) materiálová – polymer je zpracován do formy jemnější drti. Následuje sušení a případně regnanulace. Materiálová recyklace spočívá v přidání aditiv a v aplikaci tepelné a mechanické energie pro vytvoření nového materiálu s mechanickými a estetickými vlastnostmi přibližujícími se primárnímu polymeru,
- b) chemická – je založena na chemickém rozkladu plastu na produkty o mnohem nižší molární hmotnosti. Výhoda chemické recyklace spočívá v poměrně nízkých požadavcích na kvalitu vstupních surovin, ovšem nevýhodou jsou vysoké vstupní investice za stroje. Provádí se především pyrolytická nebo hydrolytická degradace za účelem recyklace polymerů a pryže pro získání paliv nebo rozpouštědel,
- c) surovinová – k recyklaci se využívají silně znečištěné plastové odpady o hustotě vyšší než 1 g.cm^{-3} . Principem recyklace jsou destrukční procesy rozkládající polymerní složky vstupní suroviny na směs kapalných a plyných uhlovodíků. Produktem recyklace jsou směsi kapalných uhlovodíků použitelné jako topné oleje a energeticky využitelný plyn,
- d) energetická – principem energetické recyklace je využití tepelné energie při spalování plastového odpadu. Plasty se spalují společně s uhlím ve speciálně konstruovaných topeništích.

5.1 Vliv bodu tání

Aby termoplast roztál, musí být ohříván nad jeho teplotu tání. Teploty tání běžných polymerů jsou uvedeny v tabulce č. 5. Jakékoliv recyklované polymery, které mohou být zpracovány a taví se pod teplotou, kdy dochází k rozkladu hemicelulóz v chemické struktuře dřeva (200 °C), jsou obvykle vhodné pro výrobu WPC. [2]

Tabulka 5 - Hodnoty bodu tání používaných polymerních matric [2]

Polyolefin	Bod tání (°C)
LDPE	115
LLDPE	123
HDPE	130
Polyetylen (PE)	135
Polypropylen (PP)	170
Polystyren (PS)	240
Polyetylen terephthalat (PET)	245
Polyamid 6 (PA6)	233

Obecně platí, že nebyly pozorovány žádné rozdíly v teplotách tání primárních a recyklovaných polymerů. Plastové odpady, které jsou získávány z komerčních produktů, mohou mít v některých případech vysokou teplotu tání. Tato teplota může dosahovat i více než 200 °C, protože obsahuje veškeré nečistoty a přísady z komerčních produktů. Teplota tání je rozhodující při recyklování směsných odpadních polymerů (z různých zdrojů i různé chemické struktury). V případě recyklovaného směsného plastového odpadu je tato směs obvykle výrazně heterogenní a různé typy odpadního plastu vykazují rozdílnou teplotou tání. Tání takové směsi poté neprobíhá v jednom teplotním bodě, ale v různém intervalu teplot. Vlivem rozdílného toku taveniny jednotlivých směsných polymerů tak vzniká vysoce heterogenní recyklát. [3, 18]

V případě odpadních polymerů směsí PP a LDPE je směs zpracována při vhodné teplotě pro podíl LDPE (115 °C), přičemž u PP k tání při této teplotě nedojde. Neroztavený PP by v konečném heterogenním produktu mohl zhoršovat mechanické vlastnosti. V případě, že je směs zpracovaná nad 170 °C (teplota tání PP), obě frakce se roztaví, ale teplota je mnohem vyšší pro frakci LDPE, kdy se může LDPE tepelně rozkládat. Degradace LDPE může způsobit značnou ztrátu mechanických vlastností směsného polymeru a výsledného produktu WPC. [4]

5.2 Vliv nemísitelnosti

Separace polymerů je velmi nákladná a proto se hledá pomocí výzkumů řešení, jak znovu využít recyklované polymery. Obecně v plastikářském průmyslu platí, že míchání polymerů je výhodný způsob, jak překonat některou základní nevýhodu nemísitelných polymerů a také způsob, jak snížit náklady na výrobu. Například nízká

rázová houževnatost PP se zlepší smícháním s jinými polymery. Nevýhodou polymerů je skutečnost, že většina z nich jsou vzájemně nemísitelné. [5]

Slabá chemická afinita na fázových rozhraních nemísitelné směsi může vést k oddělení fází, a z toho vyplývají horší mechanické vlastnosti [6]. Nízká kompatibilita mezi polymery výrazně snižuje kvalitu výsledných dřevo-plastových kompozitů modifikovaných odpadními polymery. Účinný způsob, jak zlepšit kompatibilitu mezi polymery, je použití kompatibilizačních činidel (kompatibilizátory), protože zlepšují mezifázové adheze mezi polymery a disperze jedné složky v dalších složkách. Kompatibilizéry jsou komerčně dostupné pro širokou škálu kombinací primárních polymerů [7, 31, 33]. Tato technologie může být aplikována i na recyklovaných směsích [8, 28, 33].

Různá degradace složek recyklátu při dalším zpracování může mít vliv na kompatibilitu směsi při jejím zpracování. Kompatibilita směsi recyklovaných polymerů může být například ovlivněna přítomností karbonylových skupin v důsledku působení zvýšené teploty a foto-oxidace primárního použití. Tvorba těchto karbonylových skupin v degradovaném polyolefinu může působit jako kompatibilizér pro větší slučitelnost fáze v recyklovaných polymerních směsích. Karbonylové skupiny jsou fotosenzibilátory, které urychlují fotooxidaci. [10]

Tabulka 6 - Mísitelnost mezi polymery

Polymer	PS	PA	PC	PVC	PP	LDPE	HDPE	PET
PS	M	-	-	-	-	-	-	-
PA	N	M	-	-	-	-	-	-
PC	N	N	M	-	-	-	-	-
PVC	N	N	N	M	-	-	-	-
PP	N	N	N	N	M	-	-	-
LDPE	N	N	N	N	N	M	-	-
HDPE	N	N	N	N	N	N	M	-
PET	N	N	N	N	N	N	N	M

M – mísitelný, N – nemísitelný

5.3 Vliv reologie

Index toku taveniny (ITT) je závislý na molekulové hmotnosti polymerů a její distribuci. Polymery s vyšším ITT mají kratší molekulární řetězce, tudíž nižší viskozitu a molekulovou hmotnost. Nízká teplota tání polymerů je dána delšími molekulovými

řetězci a vysokou molekulovou hmotností. Vyšší molekulová hmotnost polymeru je tedy obvykle spojená s vyšší viskozitou taveniny a také vyšším bodem měknutí. [9]

Několik autorů zkoumalo změny reologických vlastností polymerů po opakovaném vytlačování a vstřikování (termická expozice). Výsledky ukázaly podstatný pokles viskozity taveniny (zvýšení ITT) PP a PE. [11, 13] Při nedostatku antioxidantů nastává při cyklickém stárnutí zrychlená degradace polymerů. Při opakovaném vytlačování docházelo k významnému snížení molekulové hmotnosti, což způsobilo zvýšení ITT. Zvýšení ITT proběhlo v důsledku degradace polymerního řetězce a silného termického namáhání. [13] V případě PP bylo zjištěno, že tento polymer je méně stabilní než PE, proto je u PP potřeba větší koncentrace antioxidantů a stabilizátorů. [14]

5.4 Vliv síťování

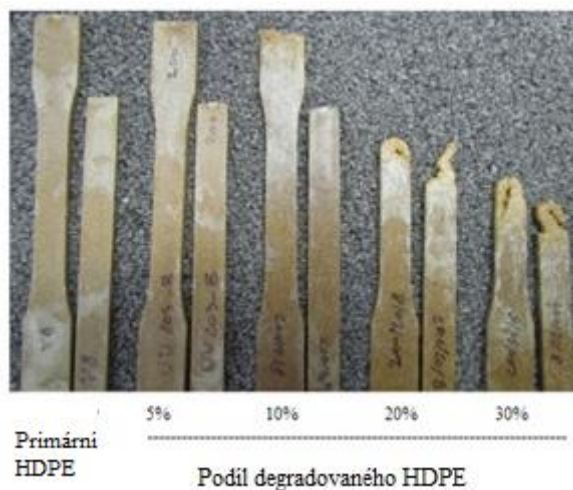
Síťované polymery jsou makromolekulární látky a jejich řetězce makromolekul jsou vzájemně spojeny chemickými vazbami, s jejichž pomocí vytváří trojrozměrnou prostorovou síť. Síťované polymery vznikají buď síťováním lineárního, nebo rozvětveného polymeru. Může k němu však dojít také při reakci dvou a více monomerů. Dodatečné síťování u polypropylenů (PP), polyetylenů (PE) a polyvinylchloridů (PVC) je prováděno pro získání lepších fyzikálně-mechanických vlastností a tvarové stálosti při zvýšených teplotách. [35]

Polymery jsou široce používány pro mnoho aplikací používaných v domácnostech, automobilovém průmyslu, ve stavebnictví a dalších oblastech. Polymery používané v exteriéru jsou vystaveny dlouhodobému slunečnímu záření, které způsobuje jejich degradaci. Z tohoto důvodu převážná část polymerů používaných v domácnostech obsahuje vyšší procento polymerů s vyšším stupněm síťování. V rámci recyklace městského komunálního odpadu tedy lze získat značné množství vysoce síťovaných polymerů. [15, 39]

Degradace některých termoplastů byla zajištěna při jejich vystavení povětrnostním vlivům, přičemž provedené studie prokázaly různé úrovně vlivu degradace plastů na proces síťování primárního PE [16, 17].



Obrázek 7 - Vstřikované vzorky primárního HDPE (vlevo); vzhled zkušebních těles HDPE, kdy před vstřikem byl HDPE vystaven 200 hodinám urychleného stárnutí (vpravo). Vzhledem k značné degradaci HDPE tento nevyplnil kompletně formu [34]



Obrázek 8 – Vzhled zkušebních těles WPC s primárním HDPE (vlevo) a s degradovaným HDPE v různém množství ve směsi, které bylo degradováno zrychlenými zkouškami. Při zvyšování obsahu degradovaného HDPE na 20 % nebo na vyšší, nedojde k vyplnění formy [19].

Polymery s vyšším stupněm degradace jsou obvykle hůře zpracovatelné. Použití recyklovaných polymerů s vyšším stupněm síťování způsobí u WPC heterogenitu v matrici vlivem neroztavení některých oblastí. Tyto neroztavené oblasti představují lokality koncentrující napětí, což výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti kompozitu. [19]

5.5 Vliv krystalinity

Krystalinita je schopnost dosáhnout určitého stupně uspořádanosti a vykazovat určitou molekulární strukturu. Tvorba struktury závisí na geometrickém tvaru řetězce, polaritě molekul, počtu rozvětvení a dalších faktorech.

Dle struktury se polymery dělí na: [21]

- amorfní – makromolekuly se vyznačující zcela nahodilou pozicí,
- krystalické – semikrystalické s pravidelným uspořádáním makromolekul.

Krystalinita signifikantně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Vyšší krystalinita zvyšuje jeho tuhost, tvrdost, a tepelný odpor. Naopak amorfní oblasti zapříčiňují spíše pružný charakter polymerních řetězců. U recyklovaných polymerů je obvykle míra množství krystalinity nižší než u primárních polymerů.

- Krystalinita PP, PE

Na základě výsledků diferenční snímací kalorimetrie (DSC) pro recyklovaný PP a PE lze usuzovat na pokles v procentech krystalinity recyklovaných polymerů [16, 18]. Snížení krystalinity probíhá u polymerů během termo-oxidace nebo foto-oxidace [21] [22].

5.6 Vliv polarity

Polarita ovlivňuje přilnavost, smáčivost a povrchovou energii polymeru, která je rozhodující při spojování materiálů.

PE a PP mají nízkou polaritu, která přispívá k vysoce hydrofobnímu charakteru. Povrchové úpravy jsou možností, jak používat modifikační vlastnosti povrchu (pro některé aplikace) těchto polymerů bez ovlivnění jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Při změnách polarity jsou některé polární skupiny indukovány v polymeru a tím se zvyšuje smáčivost a hydrofilnost. Tento jev je využíván při zvyšování adheze mezi polymerem a hydrofilním přírodním plnivem/ vlákny. Bylo zjištěno, že recyklované polymery získané z tuhých komunálních odpadů jsou vhodné pro výrobu WPC. [23]

Polymery jsou v průběhu své životnosti vystaveny UV záření za přítomnosti kyslíku a ozonu. Působení těchto faktorů významně zkracuje životnost polymerů.

Během oxidace polyolefinu (termo-oxidací a fotooxidací), je do struktury řetězce začleněno značné množství chemicky vázaného kyslíku, který je v polymeru ve formě karbonylů (ketony, aldehydy, karboxylové skupiny, a estery) a hydroxylových skupin. [24, 18]

Tvorba polárních skupin u recyklovaných polymerů, zvláště v případě PP a PE, zlepšuje kompatibilitu mezi nepolárními polymery a polárními ligno-celulózovými (dřevěnými) materiály. Oxidované polyolefiny byly úspěšně použity jako kompatibilizér pro plastické hmoty vyztužené mastkem. [26]

6 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je provést:

- a) rešerši stávajících vědeckých článků a odborné literatury zabývající se problematikou možnosti náhrady primárního polymeru recyklovaným polymerem při výrobě WPC. Dílčím cílem práce je ověřit a najít optimální poměr obou typů polymerů;
- b) experimentálně ověřit základní vlastnosti WPC kompozitů a vyhodnotit výsledné vlastnosti vzorků z WPC. Jako termoplastová matrice bude použit polypropylen (PP), množství dřevité moučky bude u všech záměsů stejné. Pro WPC záměsů se bude měnit podíl primárního a recyklovaného (odpadního) polymeru.

Důvodem, proč bylo přistoupeno k experimentální práci, byla ta skutečnost, že při stávající výrobě WPC kompozitů není běžnou zvyklostí přidávat odpadní polymer jako dílčí podíl polymerní části matrice. Právě neznalost vlastností recyklovaného polymeru a neznalost jeho vlivu na výslednou směs WPC kompozitu je příčinou, proč výrobci neprovádějí výrobu WPC kompozitů s kombinovaným podílem primárního a recyklovaného polymeru. Výrobci nejsou schopni deklarovat vlastnosti výsledného kompozitu. Na základě stanoveného experimentu bude zjištěno, zdali lze odpadní polymer z výroby využít pro jeho zpětné zpracování. Případně z dosažených výsledků analyzovat vhodný poměr recyklovaného a primárního PP ve směsi WPC, u kterého budou ověřeny jeho základní mechanické parametry.

7 Rešeršní část - vliv plnění recyklovaných a odpadních polymerů na vlastnosti WPC

Studii zabývající se způsobem výroby a vlastnostmi WPC na bázi recyklovaných termoplastů je omezené množství. Výzkumy se zaměřují na využití studiu vlivu recyklace na vlastnosti matrice, a to ve formě jedno-druhového plastového odpadu kombinací recyklovaných a primárních polymerů nebo recyklovaných plastových směsí.

7.1 Vliv na pevnostní charakteristiky

U studie účinků kombinace celulózy na vlastnosti primárních nebo recyklovaných polymerů promíchaných s odpadními frakcemi byly použity polymerní směsi složené z HDPE, PP, PS, PVC. Bylo zjištěno, že přidáním více než 12,5 % celulózy do smíšených směsí došlo ke zlepšení pevnosti v ohybu a pevnosti v tahu u směsných primárních i recyklovaných polymerů. Pro zvýšení mechanických vlastností byl použit kompatibilizér. Kompozity obsahující primární polymery vykazovaly vynikající mechanické vlastnosti na rozdíl od těch, které obsahovaly recyklované polymery. [28]

Jayaraman a Bhattacharya [29] zkoumali, zda je spotřebitelský odpad vhodný k výrobě WPC. U vytvořených kompozitů z borovicových vláken a recyklovaného HDPE byla při pokojové teplotě a vlhkosti ověřena závislost tahových a ohybových vlastností kompozitů na mechanických vlastnostech odpadních polymerů. Závěrem studie bylo, že polymery ze spotřebitelského odpadu lze úspěšně využít jako kompozitní materiály s vhodnými mechanickými vlastnostmi.

Kazemi-Najafi, S. a kol. [30] sledovali vliv PE a PP recyklovaných směsí na mechanické vlastnosti polymerů. Pevnost v ohybu a mechanické vlastnosti vzorků obsahující recyklované polymery (HDPE a PP) jsou statisticky srovnatelné se stejnými charakteristikami kompozitů z primárních polymerů. Kompozity obsahující recyklované PE a recyklované PP směsi vykazovaly vyšší modul pružnosti ve srovnání s těmi ze směsného primárního polymeru (primární PE / primární PP).

Lee, J.O. a kol. [31] studovali vliv kondenzačního činidla na vlastnosti kompozitů. Kompozity s matricí recyklovaného HDPE a plněné přírodními vlákny byly

vyrobeny prostřednictvím taveniny mícháním a lisováním. Vliv kondenzačního činidla na vlastnosti kompozitů se projevil lepší kompatibilitou mezi vlákny a recyklovaným HDPE. Mechanické vlastnosti výsledných kompozitů jsou srovnatelné s těmi, které jsou nově vyrobené z primárního HDPE.

Kazemi-Najafi, S a kol. [13] analyzovali rozdílné vlastnosti mezi primárním a recyklovaným polymerem. Vliv je u dvakrát extrudovaného PP na mechanických vlastnostech dřevité moučky / PP kompozitů. Výsledky ukázaly, že modul pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu u polypropylenu byly významně zvýšeny u primárního PP. Kompozity obsahující recyklovaný PP vykazovaly vyšší vlastnosti v ohybu a tvrdosti, než ty, které obsahují primární PP. MAPP přísada výrazně zvýšila mechanické vlastnosti kompozitu z primárního, tak i z recyklovaného PP.

Kazemi-Najafi, S. a Karl R. Englund [18] zjišťovali chování polymerů při zrychlených povětrnostních testech. Pro tento experiment byly použity primární, degradované a nechráněné polymery podrobené urychlenému zvětrávání. U primárního HDPE a nechráněného HDPE se zhoršila přilnavost dřevité moučky k HDPE matici. Zrychlené zvětrávání vysoce degradovaného HDPE vytvořilo rozsáhlé zesíťování v HDPE a následně špatnou zpracovatelnost. Pouze 10 % z primárního HDPE může být nahrazeno degradovaným polymerem, protože při vyšším obsahu degradovaného polymeru dojde k výraznému zhoršení zpracovatelnosti. Pevnosti v tahu a ohybu u polymerů, které obsahují více jak 10 % degradovaného polymeru, jsou srovnatelné s primárními polymery.

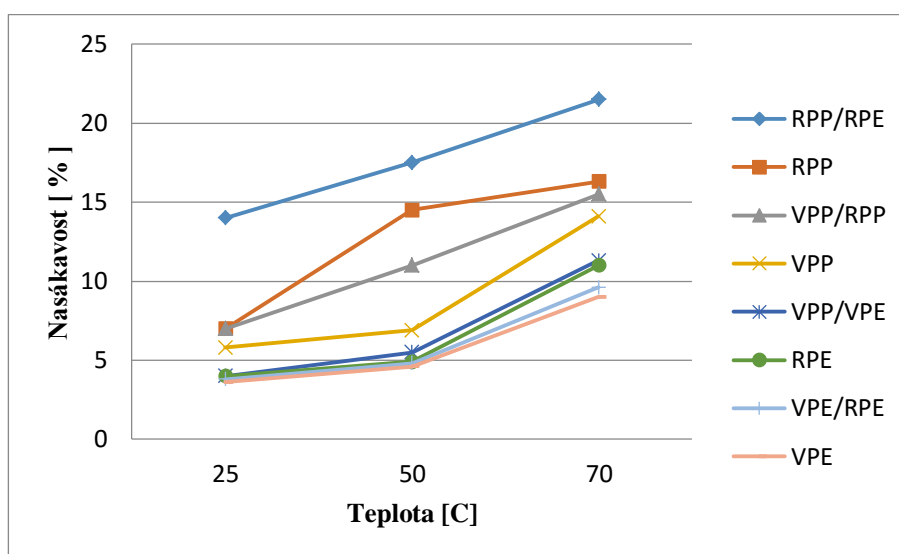
7.2 Vliv na hygroskopické vlastnosti WPC

Hygroskopické vlastnosti (absorpce vody a následná míra bobtnání a další) u dřevo-plastových kompozitů jsou závislé na jejich způsobu využití. Proto jsou hygroskopické vlastnosti při navrhování WPC velmi důležité. Primární polymery neobsahují aditiva a další přídatné látky, které vylepšují jejich vlastnosti, proto se většina výzkumů provádí na primárních polymerech. Hygroskopické vlastnosti dřeva a recyklovaných polymerů byly dosud prozkoumány pouze v malé míře.

Kazemi-Najafi, Kiaefar, a Tajvidi [30] zkoumali absorpci vody a difúzní koeficienty u recyklovaných a primárních polymerů. Maximální absorpce vody a difúzní koeficienty WPC recyklovaných polymerů (PP nebo HDPE) jsou vyšší než ty,

kteří jsou z primárních polymerů. WPC vyrobeny ze směsi recyklovaných PP a recyklovaných HDPE vykazovaly nejvyšší nasákavost a difúzní koeficient. Nasákavost u kompozitů byla stanovena kineticky Fickianovým difúzním procesem.

Studie krátkodobé nasákavosti dřevo-plastových kompozitů (WPC), vyrobených z pilin a primárního a recyklovaného polymeru (HDPE a PP) ukázaly, že absorpce vody WPC u recyklovaných polymerů je vyšší, než absorpce vody u primárních polymerů. Směsi vyrobené z recyklovaných PP a recyklovaných HDPE, vykazovaly nejvyšší absorpci vody (graf č. 1). [27]



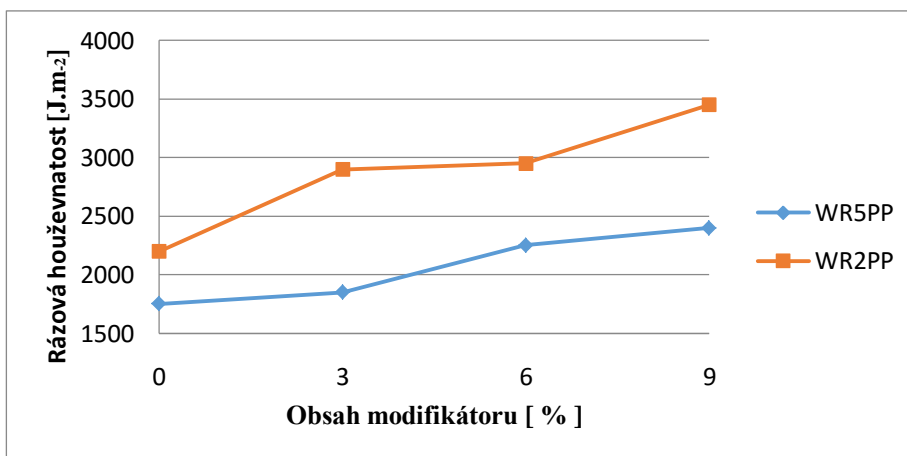
Obrázek 9 - Nasákavost kompozitů ponořených do vody po 24 hodinách při různých teplotách, V- primární polymer, R – recyklovaný [34]

Dlouhodobou studií se zabývali Kazemi-Najafi, S a kol. [20, 32], kteří zkoumali absorpci vody a tloušťku bobtnání u kompozitů z recyklovaných a primárních polymerů. Kompozity z recyklovaných polymerů byly umístěny do vody a sledovala se míra bobtnání a absorpce vody. Výsledky ukázaly, že maximální absorpce vody a tloušťka bobtnání kompozitu z primárních a recyklovaných polymerů (PP a HDPE) jsou srovnatelné. Při zvýšeném podílu recyklovaných polymerů se míra bobtnání zvyšuje. Kompozity obsahující směs recyklovaného HDPE a kompozity PP vykazovaly nejvyšší míru bobtnání. U recyklovaných polymerů dosahuje nevyšších hodnot difúzní koeficient, absorpce a nasákavost. Míra bobtnání vycházela ve většině výzkumů vyšší u recyklovaných polymerů oproti primárním polymerům. Při použití kompatibilizérů lze míru bobtnání snížit. Absorpci vody a tloušťku bobtnání lze výrazně snížit použitím kompatibilizérů (MAPP) v kompozitní směsi.

7.3 Vliv na rázovou houževnatost WPC

Na rozdíl od pevnosti v ohybu, pevnosti v tahu a hygroskopických vlastností, téměř všechny výzkumy ukázaly nižší hodnoty rázové houževnatosti u WPC z recyklovaných polymerů než u těch, které obsahují primární polymery. Výrazný rozdíl v rázové houževnatosti je u materiálů obsahujících primární PP a recyklovaný PP. U HDPE kompozitů rázová houževnatost se zvyšujícím podílem recyklátu klesla přibližně o 20 %. Rázová houževnatost WPC z dvakrát extrudovaného polypropylenu je výrazně nižší, než při použití primárního polypropylenu. [34]

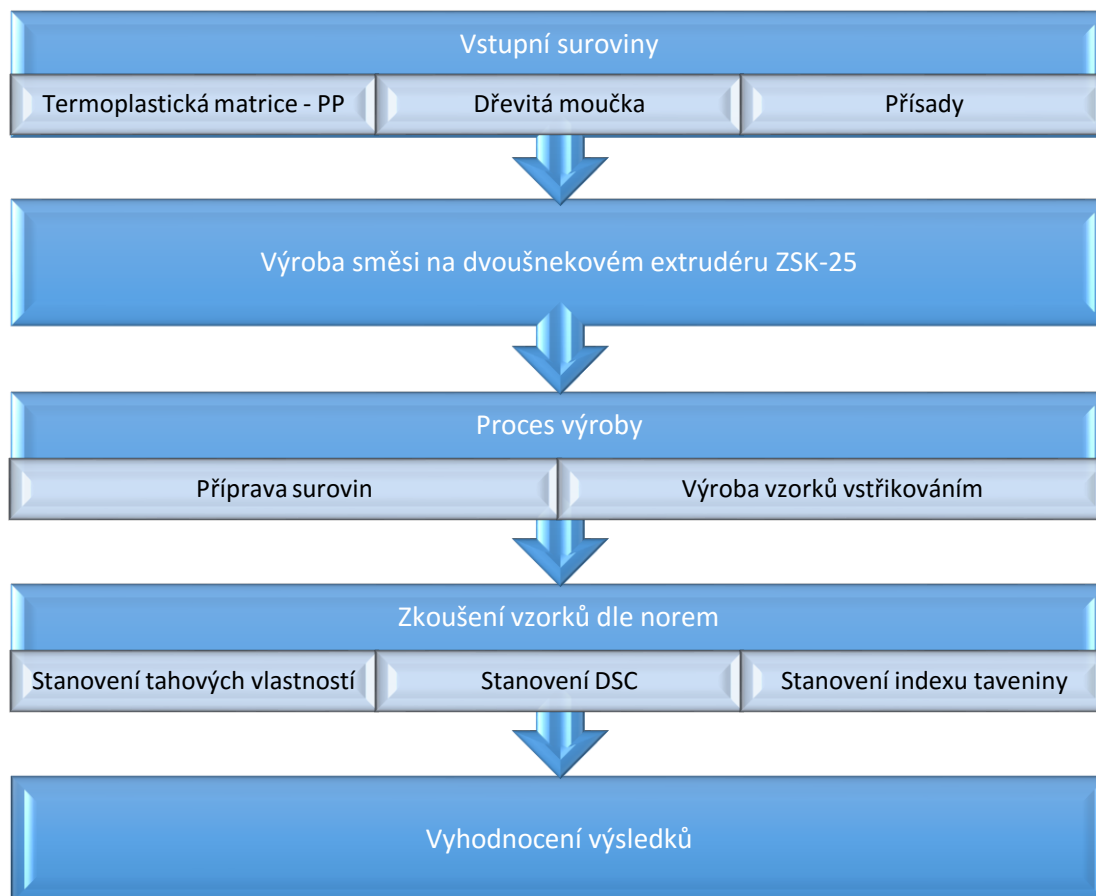
Kazemi-Najafi, S a kol. [20] studovali vliv dvou modifikátorů (EPDM a EVA) na rázovou houževnatost. Vliv etylen-propylen-dienového monomeru (EPDM) je u dvou až pětkrát extrudovaných PP pozitivní. Rázová houževnatost se u recyklovaného kompozitu složeného z pilin a polypropylenu zvýšila. Přidáním etylen-vinyl-acetátu (EVA) bylo dosaženo nejlepších výsledků. Zvýšením obsahu EVA až na 9 % se rázová houževnatost kompozitu obsahující recyklované PP významně zvýšila, ale byla stále nižší než rázová pevnost v materiálech obsahujících pouze primární PP (graf č. 2). EVA snižuje pevnost v ohybu a index dřevité moučky u recyklovaných PP kompozitů.



Obrázek 10 - Vliv modifikátoru rázové houževnatosti (EVA) na rázovou houževnatost z WPC, W – dřevitá moučka, V – primární, R2 – dvakrát recyklovaný, R5 – pětkrát recyklovaný [20]

8 Experimentální část

8.1 Výrobní proces



8.2 Použité suroviny

a) Primární polypropylen

INNOPOL CS 2-800 je lineární polypropylen, kopolymer, určený pro výrobu vstřikováním. V tabulce 7 jsou znázorněné charakteristické hodnoty dle výrobce.

Tabulka 7 - Charakteristické vlastnosti primárního polypropylenu

Obchodní označení	INNOPOL CS 2-800
Hustota	900 kg.m ⁻³
Index toku taveniny	0,4 g/10 min
Napětí na mezi kluzu	28 MPa
Tažnost na mezi kluzu	10 %
Ohybový modul	1 300 MPa
Vrubová houževnatost Charpy 23 °C	65 KJ.m ⁻²
Teplota měknutí dle Vicata	150 °C

Barva	bílá
Výrobce	INNO-COMP LTD.

b) Recyklovaný polypropylen

Použitý polypropylen je šedá drť z trubek, jež byla z výroby dvakrát extrudovaná.

c) Dřevitá moučka

Dřevitá moučka vznikla mechanickým rozmletím pilin, dodavatel Mlýn Bělkovice. Obsah kůry v dřevité moučce je přípustný v množství maximálně do 4 %. Charakteristické hodnoty dřevité moučky jsou znázorněny v tabulce 8.

Tabulka 8 - Charakteristické vlastnosti dřevité moučky

Druh	Dřevitá moučka 2B - Bělkovice
Skupenství	Pevné
Struktura	Převážně vláknitá
Barva	Světlý odstín
Měrná hmotnost	200 g.litr ⁻¹
Teplota vznícení	347 °C

Stupně jemnosti [mm]	0,10	0,16	0,20	0,25	0,315	0,40
Procentuální zastoupení	do 10 %	do 20 %	do 35 %	do 25 %	do 5 %	0

d) Přísady

S ohledem na lepší zpracovatelnost a přilnavost termoplastové matrice a dřevité moučky byly použity následující přísady:

- Sušidlo - dávkování – 2 % z množství WPC
- Kompatibilizér PP-MAH – v množství 1,33 % z WPC

8.3 Výroba WPC

a) Příprava surovin

Jako pojivo byl použit primární polypropylen (PP) INNOPOL CS 2-800 a jako recyklovaný polypropylen byla použita drť z trubek. Podíl plniva zastávala dřevitá moučka 2B - Bělkovice. Přísady zastupovali kompatibilizér – Vosk PP-MAH a sušidlo. Dřevitá moučka se připravila rozmletím pilin na maximální jemnost mletí 0,315 mm.

b) Homogenizace

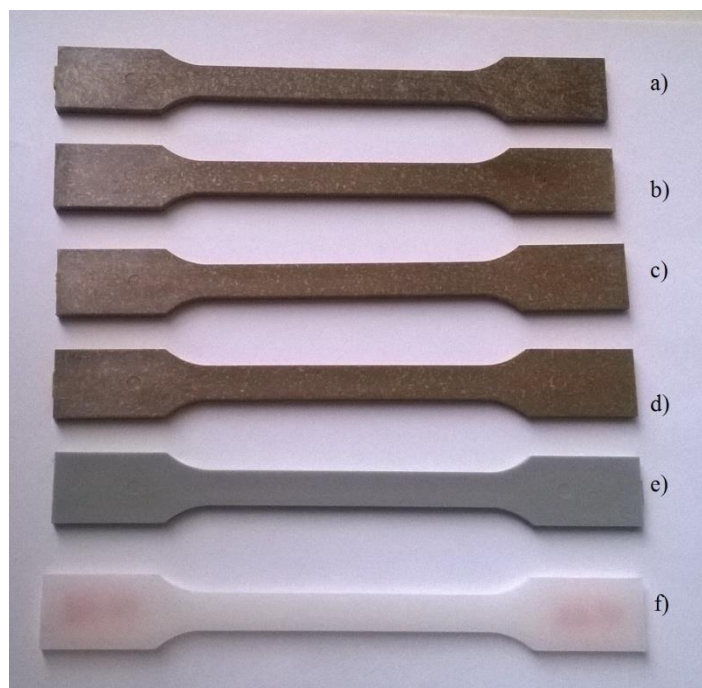
Směsi byly vyrobené na dvoušnekovém extrudéru ZSK-25 při rychlosti 200 ot/min a výkonu 6 kg.hod⁻¹.

c) Vstřikování

Vstřikováním byly vyrobeny ISO tělesa – lopatky na vstřikovacím stroji Arburg Allrounde 320C.

Při výrobě primárního nebo recyklovaného polypropyleny (regranulovaná šedá drť) byla teplota tání v rozmezí 230 až 250 °C. Forma byla předeřtá na teplotu 40 °C.

Při výrobě WPC I – IV/40 % dřevité moučky byla teplota tání v rozmezí 180 – 200 °C. Teplota formy byla zvýšena o 10 °C oproti formě u primárního a recyklovaného polypropyleny, aby se omezilo zatuhnutí taveniny ve vtoku.



Obrázek 11 - Zkušební vzorky vyrobené vstřikováním; a) WPC I; b) WPC II; c) WPC III; d) WPC IV; e) recyklovaný polymer; f) primární polymer

8.4 Receptury

Následující tabulka dokládá procentuální rozvržení jednotlivých polymerů, přísad a dřevité moučky v procentech. Složení směsí bylo navrženo následovně:

- referenční vzorky zahrnují pouze 100% primární polypropylen bez použitých přísad.
- u všech WPC kompozitů je konstantní podíl dřevité moučky a přísad; jednotlivé směsi WPC jsou specifikovány v následující tabulce 9,
- recyklované polymery se skládají pouze z recyklátu PP

Tabulka 9 - Složení vstupních surovin

Položka	Vzorek	Primární polymer [%]	Dřevitá moučka [%]	Recyklovaný polymer [%]	Sušidlo [%]	Kompatibilizér PP-MAH [%]
1	Primární PP	100,00	0	0	0	0
2	WPC I	56,66	40	0	2,00	1,33
3	WPC II	50,00		6,67	2,00	1,33
4	WPC III	43,33		13,34	2,00	1,33
5	WPC IV	36,66		20,00	2,00	1,33
6	Recyklovaný PP	0	0	100	0	0

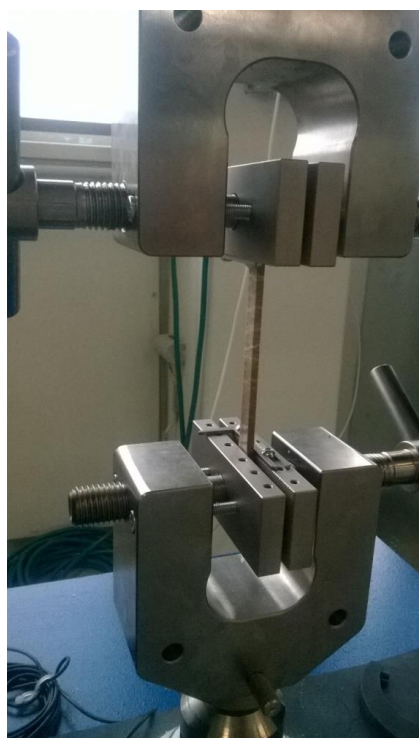
8.5 Zkušební metody

8.5.1 Pevnost v tahu

Stanovení tahových vlastností plastů a plastových kompozitů bylo provedeno dle ČSN EN ISO 527-1. Záznam hodnot se uskutečňuje pomocí průtahoměrů nebo pomocí tenzometrů. Výsledkem měření je křivka, která udává závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení. Z křivky lze určit i modul pružnosti, který se stanovuje z deformačních křivek z lineární oblasti, kde je napětí přímo úměrné deformaci. [42]



Obrázek 12 – Trhací stroj



Obrázek 13 – Upnutí zkušební vzorku

8.5.2 Měření indexu toku taveniny (ITT)

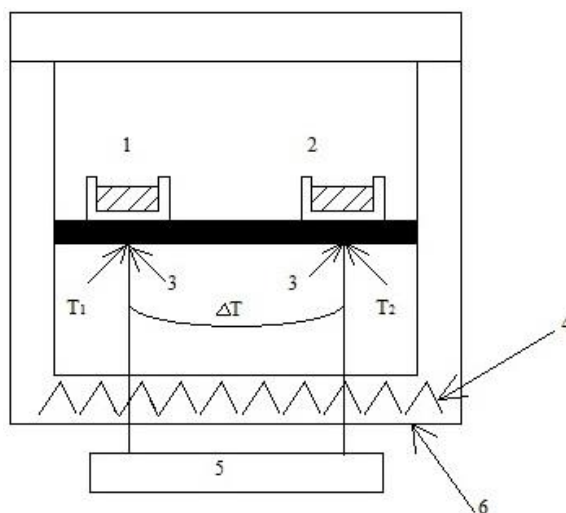
Stanovení indexu toku taveniny (ITT) bylo provedeno na plastometru M-201 odřezáváním v souladu dle ČSN EN ISO 11357-1. Hodnota ITT udává, jaké množství taveniny v gramech, které proteče tryskou daných rozměrů (o průměru $2,095 \pm 0,005$ mm a délce $8,000 \pm 0,025$ mm) za 10 minut při určených podmínkách.

8.5.3 Diferenciální snímací kalorimetrie

Norma ČSN EN ISO 11357-1 specifikuje metodu diferenciální snímací kalorimetrie (DSC) pro termickou analýzu polymerů. DSC se používá pro určování

složení a kvality surovin. Princip DSC je postup, při kterém se určí rozdíl rychlostí toku tepla v kelímku se zkušebním vzorkem a v referenčním kelímku [45].

Vzorky se umístily do hliníkového kelímku a byly zváženy. Ohřev probíhal od 40 do 250 °C při nárůstu teplot 10 °C/min. Následně byla určena z termografů teplota tání pro jednotlivé směsi polyolefinů.



Obrázek 14 - Schéma znázorňující základní principy DSC s tepelným tokem; 1.stanoviště zkušební vzorku; 2. referenční stanoviště; 3. termočlánky; 4. topné těleso; 5. měřící obvod pro T_{vzorku} ; 6. Okraj pícky; T_1 . teplota stanoviště zkušební vzorku T_{vzorku} ; T_2 . teplota referenčního stanoviště; ΔT . teplotní rozdíl mezi stanovištěm zkušební vzorku a referenčním stanovištěm. [45]

9 Výsledky zkoušek

9.1 Pevnost v tahu

U primárního a recyklovaného polypropylenu byla tahová zkouška ukončena při 20 % prodloužení. Ke zkoušce bylo použito šest receptur po šesti vzorcích. Z výsledných naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr pro každý typ zkušebního tělesa. Výsledky průměrných hodnot pevností v tahu, směrodatné odchylky a moduly pružnosti všech záměsí jsou uvedeny v tabulce č. 10. Hodnoty všech zkušebních těles jsou uvedeny v příloze.

Tabulka 10 - Naměřené průměrné hodnoty pevností v tahu, prodloužení

Vzorek	Průměrné pevnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka	Modul pružnosti [MPa]
PP - primární	25,71	0,55	1370
PP - recyklovaný	25,00	0,31	1330
WPC I	21,57	0,49	3060
WPC II	21,75	0,80	2870
WPC III	20,65	0,35	3330
WPC IV	21,71	0,76	3410

9.2 Měření indexu toku taveniny (ITT)

Výsledky pro jednotlivé směsi jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty ITT primárního a recyklovaného PP

Polymer	ITT (230 °C, 2,16 kg) [g.10 ⁻¹ min]
Primární PP - Innopol CS2-800	0,30
Recyklovaný PP – 2x extrudovaný	0,44

9.3 Stanovení diferenční snímací kalorimetrie (DSC)

Provedenou DSC analýzou vzorků recyklovaného PP, primárního PP a vzorku WPC IV byla zjišťovaná teplota tání termoplastické matrice u všech sledovaných záměsí.

Tabulka 12 – Teploty tání termoplastické matrice

Vzorek	T _M [°C]
PP – primární	172
PP – recyklovaný	170
WPC IV	171

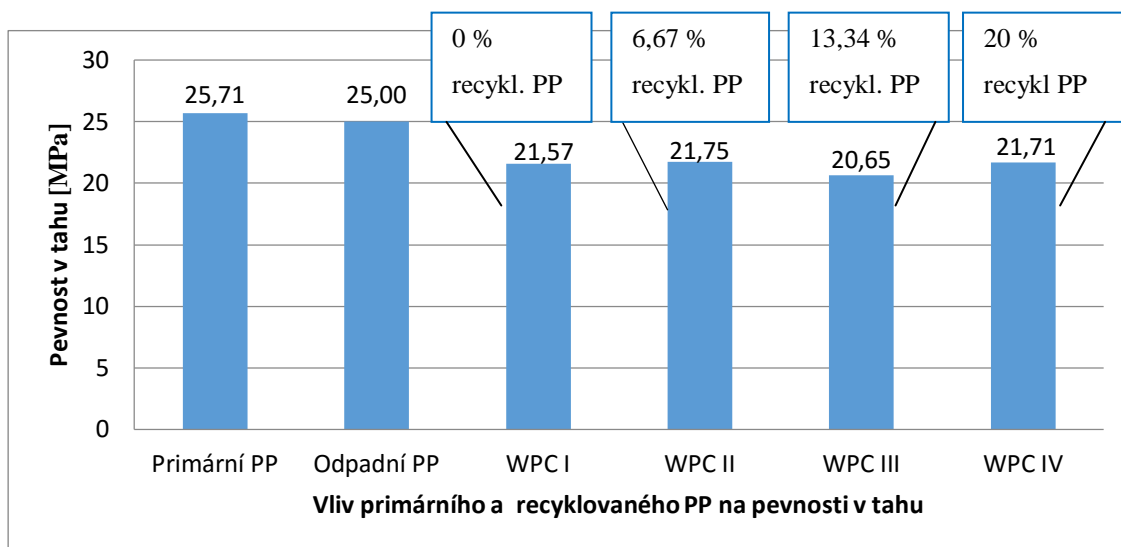
9.4 Vyhodnocení výsledků a diskuze

9.4.1 Pevnost v tahu

Rozdíl v pevnostech v tahu mezi primárním a recyklovaným polypropylenem nebyl výrazný. Rozdíl nebyl zjištěn i přesto, že recyklovaný PP vzniklý jako odpad byl vystaven dvojnásobné extruzi s termickou zátěží. Modul pružnosti recyklovaného PP vykázal stejných hodnot jako u primárního polymeru.

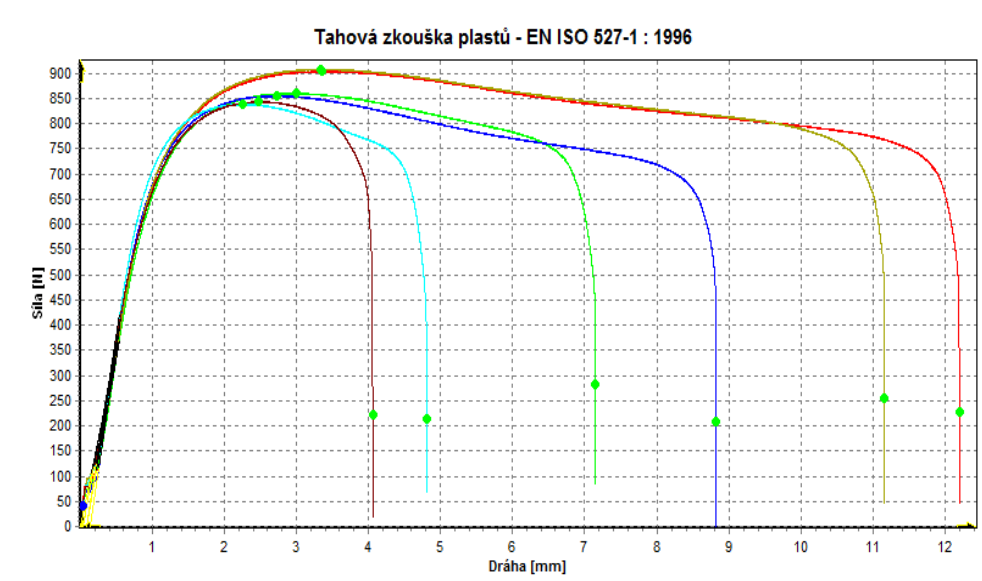
Vliv plnění dřevitou moučkou (podíl dřevité moučky je u všech směsí 40 %) způsobil pokles pevnosti v tahu průměrně o 17 % oproti referenčnímu polymeru (primárním PP). U WPC bylo dosaženo poklesu prodloužení cca o 26 % oproti primárnímu polymeru. Naopak přidáním dřevní moučky do polymerní matrice byla výrazně zvýšena hodnota modulu pružnosti u WPC směsí zhruba o 43 %.

Na následujícím grafu jsou znázorněny průměrné hodnoty pevností v tahu všech receptur. Podíl dřevité moučky způsobil přibližně stejný pokles u všech WPC směsí, zhruba o 17 % oproti primárnímu neplněnému polypropylenu. Při různém podílu recyklovaného polymeru ve všech sledovaných WPC směsí lze pozorovat, že nedochází ke změnám pevností v tahu, tudíž nebyl zaznamenán se zvyšujícím se množstvím recyklátu polypropyleny jakýkoliv pokles pevností.



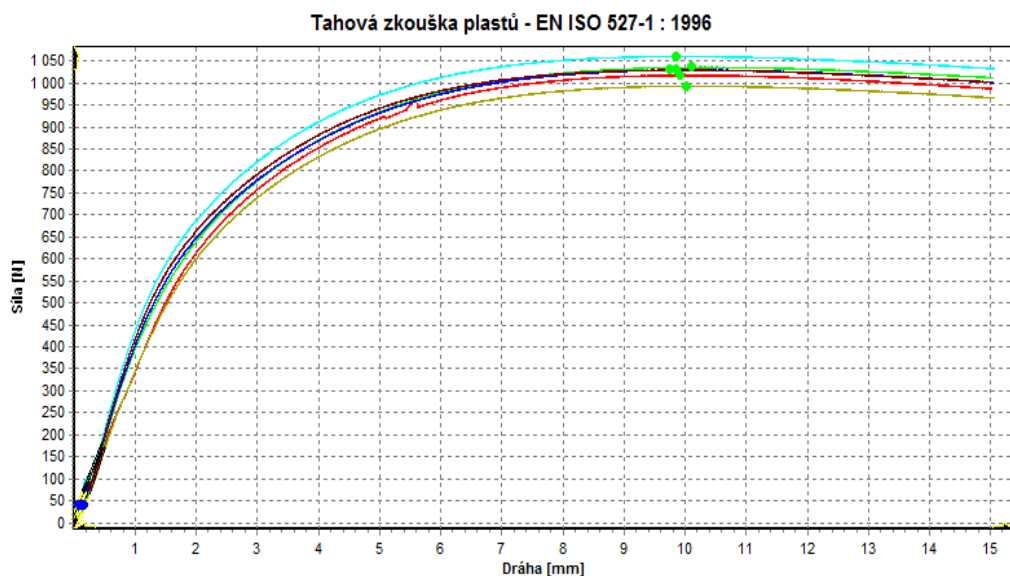
Obrázek 15 - Grafické znázornění vlivu primárního a odpadního polymeru na pevnosti v tahu

Dle předpokladu bylo zjištěno, že dřevní plnivo významně snižuje plasticitu směsi. Na obrázku 16 lze pozorovat velký rozptyl hodnot poměrného prodloužení u vzorků WPC (trend byl totožný u všech sledovaných WPC směsí).

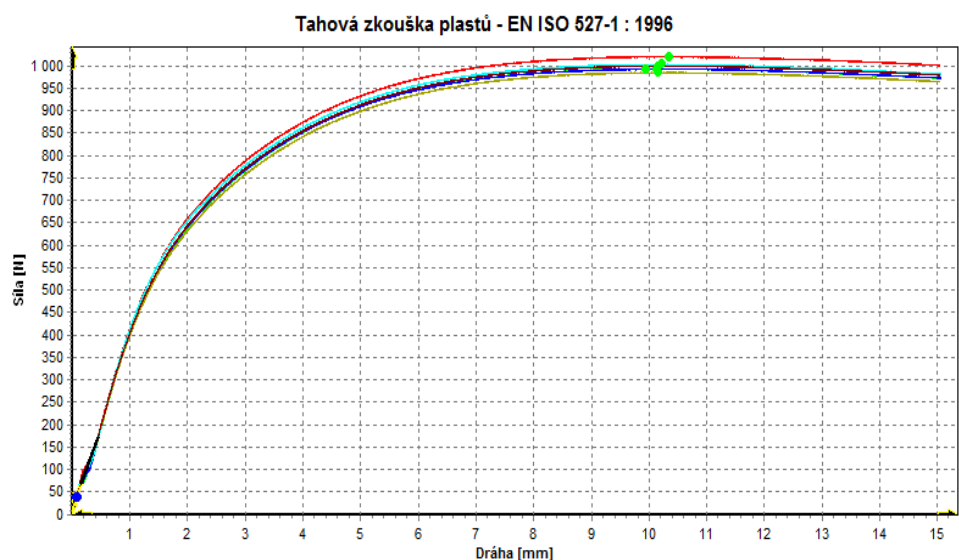


Obrázek 16 - Průběh pevností v tahu jednotlivých vzorků WPC IV

Na obrázku 16 a 17 lze pozorovat průběh tahových křivek primárního polypropylenu a recyklovaného polymeru (po dvojnásobné termické extruzi). Je patrné, že u recyklovaného polymeru nebyl zjištěn pokles plasticity a hodnoty pevnosti vlivem možné termické degradace.



Obrázek 17 - Průběh pevností v tahu jednotlivých vzorků u primárního PP



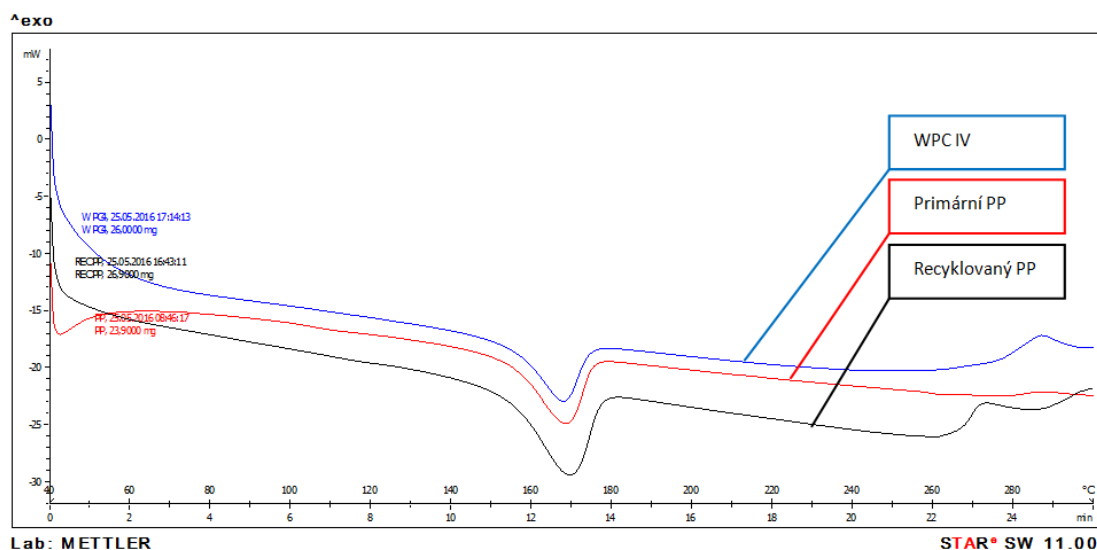
Obrázek 18 - Průběh pevností v tahu jednotlivých vzorků u recyklovaného PP

9.4.2 Index toku taveniny

Při porovnání indexu toku taveniny (ITT) mezi primárním a recyklovaným polymerem byla potvrzena vyšší hodnota ITT u recyklovaného polymeru o 9 %, jež lze přičíst termické degradaci materiálu vlivem dvojnásobného termického namáhání. Z hlediska morfologie plastů tato expozice způsobila kratší řetězce a z toho vyplývající nižší molekulovou hmotnost polymeru.

9.4.3 Diferenční snímací kalorimetrie

Bylo zjištěno, že teploty tání T_m primárního a recyklovaného polypropyleny nevykazovaly významné rozdíly, které by mohly být způsobeny odlišným výrobním či technologickým zpracováním. Rovněž u vzorku WPCIV nebylo dosaženo významného snížení hodnoty T_m . S ohledem na tuto skutečnost lze konstatovat, že recyklované polymery mohou částečně nahradit primární polymery při výrobě WPC bez významného vlivu snížení hodnot T_m .



Obrázek 19 - Vyhodnocení teplot tání u primárního PP, recyklovaného PP a WPC IV

10 Závěr

Dřevo-plastové kompozity jsou materiály s velmi výhodnými vlastnostmi, snadnou údržbou a příjemným přírodním dojmem. Díky vyššímu modulu pružnosti je WPC materiál oproti polymerním materiálům více odolný vůči vnějšímu namáhání. Jelikož jednou z hlavních složek pro výrobu WPC je termoplastová matrice, v souladu s globální tendencí ochrany environmentu vyplývá požadavek na efektivní snížení využití těchto primárních polymerů. Toto lze řešit případnou integrací recyklovaných polymerů do výrobního procesu při zachování kvalitativních požadavků na výstupní materiál.

Problematika použití plastového recyklátu jako případná náhrada matrice dřevoplastového kompozitu byla rozebrána z teoretického i praktického hlediska. V teoretické části práce bylo provedeno detailní shrnutí obecných charakteristik WPC, jeho výroby a vlastností se zaměřením na běžně uplatňované komerční produkty. Praktická část pak navázala definicí klíčových vlastností plastového recyklátu, u nichž lze předpokládat negativní působení na konečné charakteristiky kompozitu. Definice těchto vlastností byla provedena na základě odborné rešerše zabývající se danou problematikou. Výstupy rešerše poukázaly na nutnost zohlednit některé parametry při výběru recyklátu, zejména pak obsah nečistot, rozdílné hodnoty teploty tání směsných odpadních plastů, absorpci vody a míru bobtnání. Tyto faktory mohou výrazně ovlivnit bod tání, reologii, síťování polymerů, mechanické vlastnosti či zpracovatelnost finálních směsí. Nicméně z rešerší vyplývá, že mechanické vlastnosti kompozitů z recyklovaných polymerů jsou srovnatelné s vlastnostmi kompozitů z primárních polymerů; z hlediska fyzikálních však bylo zjištěno, že se snižují parametry vztahující se k absorpci vody v případě použití recyklovaných polymerů.

Náplní experimentální části práce bylo zjistit optimální poměr primárního a recyklovaného polymeru v dřevoplastové matici pro dosažení vhodných mechanických vlastností. Během experimentu se ověřilo, že recyklované polymery jsou vhodné jako částečná náhrada u WPC kompozitů. Při zkoušení odpadního polymeru ve WPC kompozitu pevnosti v tahu poklesly o necelé tři procenta oproti směsi s primárním PP, což je velmi zanedbatelná hodnota poklesu. A to i přes to, že recyklovaný PP prošel dvojnásobnou extruzí (termická degradace). U WPC kompozitů s rozdílným obsahem recyklátu (0; 6,7; 13,3 a 20,0 %) nedošlo k výraznějším odchylkám v dosažených

pevnostech. Z toho vyplývá, že měnící se poměr odpadního a primárního polypropylenu nemá výrazný vliv na pevnosti. S ohledem na skutečnost, že nedošlo ke snížení pevností při použití recyklovaného PP, nebylo dle zadání práce přistoupeno k aplikaci plniv (mastku) do směsí, čímž by bylo zajištěno zvýšení finální pevnosti WPC směsí.

Pro finální rozhodnutí, zdali lze odpadní polymer použít při výrobě WPC směsí, by měly být v navazujících experimentech provedeny fyzikální zkoušky vztahující se k absorpci vody. V případě, že tyto vlastnosti nebudou vykazovat výrazný nárůst hodnot nasákavosti, jeví se 20% plnění odpadním polymerem vhodným pro výrobu WPC materiálu.

11 Literatura

- [1] EDITED BY KRISTIINA OKSMAN NISKA AND MOHINI SAIN. *Wood-polymer composites*. Cambridge, U.K: Woodhead Pub, 2008. ISBN 9781845692728.
- [2] RAHMAN, Khandkar- Siddikur, Md ISLAM, Md RAHMAN, Md HANNAN, Rudi DUNGANI a HPS KHALIL. Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties. *SpringerPlus* [online]. 2013, **2**(1), 629- [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1186/2193-1801-2-629. ISSN 2193-1801. Dostupné z: <http://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/2193-1801-2-629>
- [3] ACHILIAS, D.S, ANTONAKOU, E, ROUPAKIAS, C, MEGALOKONOMOS, P., a LAPPAS, A. *Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes*. Global NEST Journal 10, 2008. 114-122. ISBN 11084006. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-68449100935&origin=inward&txGid=0>
- [4] VANNESSA GOODSHIP. *Introduction to Plastics Recycling*. 2. vydání. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4 NR, United Kingdom: Smithers Rapra. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/46106237/Introduction-to-Plastics-Recycling-Second-Edition>
- [5] MEHRABZADEH, M a GHASEMI, I. *Study of mechanical properties, thermal behavior and morphology of PP/HDPE and PP/LDPE blends*. 1997. 75–81. Dostupné z: http://www.iranwpc.ir/docs/use_of_recycled_plastics_in_wood_plastic_composites_EN.pdf
- [6] MANAS CHANDA a SALIL K. ROY. *Plastics Technology Handbook*. 4. vydání. 2006. ISBN 9781420006360.
- [7] FLARIS, V., M. D. ZIPPER, G. P. SIMON a A. J. HILL. Compatibilized linear low-density polyethylene/isotactic polypropylene blends studied by positron annihilation lifetime spectroscopy. *Polymer Engineering and Science* [online]. 1995, **35**(1), 28-33 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1002/pen.760350105. ISSN 0032-3888. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.760350105>
- [8] FANG, Z, ZENG, M, CAI, G and XU, C (2001), Application of phase dispersion-crosslinking synergism on recycling commingled plastic wastes. *J. Appl. Polym. Sci.*, 82: 2947-2952. DOI:10.1002/app.2150. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.2150/abstract>

- [9] LA MANTIA, F.P. a D. CURTO. Recycling of degraded polyethylene: Blends with nylon 6. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1992,**36**(2), 131-135 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/0141-3910(92)90149-Y. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/014139109290149Y>
- [10] A BRENT STRONG. *Plastics : materials and processing*. 2. vydání. Prentice Hall: Upper Saddle River ; Columbus, 2000. ISBN 0130216267 9780130216267.
- [11] GUERRICA-ECHEVARRÍA, G., J.I. EGUIAZÁBAL a J. NAZÁBAL. Effects of reprocessing conditions on the properties of unfilled and talc-filled polypropylene. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1996,**53**(1), 1-8 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/0141-3910(96)00018-3. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141391096000183>
- [12] KLESOV, A. A. *Wood-plastic composites*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007. ISBN 0470148918. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470165935.fmatter/pdf>
- [13] KAZEMI-NAJAFI, Saeed, M. MOSTAFAZADEH-MARZANAKI, M. TAJVIDI and M. CHAHARMAHALI, 2009. Effect of Thermomechanical Degradation of Polypropylene on Mechanical Properties of Wood-Polypropylene Composites. *Journal of Composite Materials* [online]. 2009, **43**(22), 2543-2554 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1177/0021998309345349. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <http://jcm.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0021998309345349>
- [14] SADRMOHAGHEGH, C. a G. SCOTT. Effect of reprocessing on polymers: Part II—Polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*[online]. 1981, **3**(5), 333-340 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/0141-3910(81)90039-2. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141391081900392>
- [15] CIESIELSKA, D. a LIU, P. *Conference proceedings at ANTEC '98 : plastics on my mind, Society of Plastics Engineers, Atlanta, Georgia, April 26-April 30, 1998*. 3. vydání. Eastern Illinois University: Brookfield Center, CT: Society of Plastics Engineers, Inc. (SPE), 1998. ISBN 9781566766692 [1566766699].
- [16] VALADEZ-GONZALEZ, A., J.M. CERVANTES-UC a L. VELEVA. Mineral filler influence on the photo-oxidation of high density polyethylene: I. Accelerated UV chamber exposure test. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1999, **63**(2), 253-260 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/S0141-3910(98)00102-5. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391098001025>
- [17] GIROIS, S., L. AUDOUIN, J. VERDU, P. DELPRAT a G. MAROT. Molecular

- weight changes during the photooxidation of isotactic polypropylene. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1996, **51**(2), 125-132 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/0141-3910(95)00166-2. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141391095001662>
- [18] KAZEMI-NAJAFI, Saeed a Karl R. ENGLUND. Effect of highly degraded high-density polyethylene (HDPE) on processing and mechanical properties of wood flour-HDPE composites. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2013, **129**(6), 3404-3410 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1002/app.39021. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.39021>
- [19] SATOTO, Rahmat, Wiwik S. SUBOWO, Retno YUSIASIH, Yoshimitsu TAKANE, Yasushi WATANABE a Tatsuko HATAKEYAMA. Weathering of high-density polyethylene in different latitudes. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1997, **56**(3), 275-279 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/S0141-3910(96)00213-3. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391096002133>
- [20] KAZEMI-NAJAFI, S., MOSTAFAZADEH-MARZNAKI, M a CHARMAHALI, M., *Effect of thermo-mechanical degradation of polypropylene on hygroscopic characteristics of wood flour-polypropylene composites*. *Journal of Polymers and the Environment* 18, 2010. 720-726 Dostupné z: http://www.iranwpc.ir/docs/use_of_recycled_plastics_in_wood_plastic_composites_EN.pdf
- [21] SM TAMBOLI, ST MHASKE a DD KALE. Crosslinked polyethylene. ., *Indian journal of chemical technology*. 6. Institute of Chemical Technology, University of Mumbai, Matunga, Mumbai 400 019, India, 2004/11/1, s. 853-864. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Shashank_Mhaske/publication/267405888_Crosslinked_polyethylene/links/547d3ece0cf2cfe203c20265.pdf
- [22] Narasimhamurthy, Nanjunda, "Development of Commercial Applications for Recycled Plastics Using Finite Element Analysis" (2005). *All Theses and Dissertations*. Paper 684. Dostupné z: <http://scholarsarchive.byu.edu/etd/68>
- [23] CHO, Jung-Dae, Soon-Gi KIM a Jin-Who HONG. Surface modification of polypropylene sheets by UV-radiation grafting polymerization. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2006, **99**(4), 1446-1461 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1002/app.22631. ISSN 0021-8995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.22631>
- [24] HOEKSTRA, H.D., J.L. SPOORMAKER, J. BREEN, L. AUDOUIN a J.

- VERDU. UV-exposure of stabilized and non-stabilized HDPE films: physico-chemical characterization. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1995, **49**(2), 251-262 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/0141-3910(95)87007-5. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141391095870075>
- [25] IRING, M., F. TÜDÖS, Zs. FODOR a T. KELEN. The thermo-oxidative degradation of polyolefines—Part 10. Correlation between the formation of carboxyl groups and scission in the oxidation of polyethylene in the melt phase. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1980, **2**(2), 143-153 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/0141-3910(80)90036-1. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141391080900361>
- [26] ABDOUSS, Majid, Naser Sharifi SANJANI, Fariborz AZIZINEJAD a Mohsen SHABANI. Effects of compatibilization of oxidized polypropylene on PP blends of PP/PA6 and PP/talc. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2004, **92**(5), 2871-2883 [cit. 2016-05-14]. DOI: 10.1002/app.20207. ISSN 0021-8995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.20207>
- [27] KAZEMI NAJAFI, Saeed, Mehdi TAJVIDI a Elham HAMIDINA. Effect of temperature, plastic type and virginity on the water uptake of sawdust/plastic composites. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2007-9-12, **65**(5), 377-382 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1007/s00107-007-0176-6. ISSN 0018-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-007-0176-6>
- [28] Ha, Chang-Sik; Pusan Natl Univ, Pusan, South Korea [online]. , - [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0033327902&origin=inward&txGid=0>
- [29] JAYARAMAN, Krishnan a Debes BHATTACHARYYA. Mechanical performance of woodfibre–waste plastic composite materials. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2004, **41**(4), 307-319 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/j.resconrec.2003.12.001. ISSN 09213449. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344903001812>
- [30] NAJAFI, S. K., A. KIAEFAR, E. HAMIDINA a M. TAJVIDI. Water Absorption Behavior of Composites from Sawdust and Recycled Plastics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2007, **26**(3), 341-348 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1177/0731684407072519. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <http://jrp.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0731684407072519>
- [31] KIM, Doohyun, Hyun Geun OCK, Kyung Hyun AHN a Seung Jong LEE. Rheology and Morphology of PP/ionomer/clay Nanocomposites Depending on Selective Dispersion of Organoclays. *Korean Chemical Engineering*

- Research* [online]. 2015, **53**(6), 709-716 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.9713/kcer.2015.53.6.709. ISSN 0304-128x. Dostupné z: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=HHGHHL&py=2015&vnc=v53n6&sp=709>
- [32] ADHIKARY, Kamal B., Shusheng PANG a Mark P. STAIGER. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering* [online]. 2008, **39**(5), 807-815 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.10.005. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135983680700145X>
- [33] BERTIN, Sylvie a Jean-Jacques ROBIN. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends. *European Polymer Journal*[online]. 2002, **38**(11), 2255-2264 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/S0014-3057(02)00111-8. ISSN 00143057. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0014305702001118>
- [34] KAZEMI NAJAFI, Saeed, Azadeh KIAEIFAR, Mehdi TAJVIDI a Elham HAMIDINIA. Hygroscopic thickness swelling rate of composites from sawdust and recycled plastics. *Wood Science and Technology* [online]. 2008, **42**(2), 161-168 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1007/s00226-007-0163-4. ISSN 0043-7719. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00226-007-0163-4>
- HULL, T. Richard, Artur WITKOWSKI a Luke HOLLINGBERRY. Fire retardant action of mineral fillers. *Polymer Degradation and Stability*[online]. 2011, **96**(8), 1462-1469 [cit. 2016-05-17]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.006. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391011001807>
- HULL, T. Richard. a Baljinder K. KANDOLA. *Fire retardancy of polymers: new strategies and mechanisms*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, c2009. ISBN 0854041494.
- [35] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [36] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [37] FOREST PRODUCT LABORATORY. *Wood handbook: Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL – GTR – 113. Madison, WI: U.S: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory,

1999.

- [38] BAIER JIŘÍ a TÝN ZDENĚK. *Ochrana dřeva*. Grada Publishing, Praha, 1996.
- [39] [HERMAN F. MARK. EXECUTIVE ED. JACQUELINE I. KROSCWITZ]. *Encyclopedia of polymer science and technology*. 3. ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2003. ISBN 9780471275077.
- [40] DUCHÁČEK V. *Technologické trendy ve zpracování plastových a pryžových odpadů: ODPADY PRAHA 99*. 30-32. Praha: SOP ČR, 1999.
- [41] DUCHÁČEK V. *Polymerní odpady: Odpady, jejich využití a zneškodňování, část 2*. 16-24. Praha: VŠCHT, 2010.
- [42] ČSN EN ISO 527-1. Stanovení tahových vlastností-Část 1: Obecné principy, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012
- [43] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [44] ČSN EN ISO 1133-1, Plasty – stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů, Část 1: Standardní metoda, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [45] ČSN EN ISO 11357-1, Plasty – Diferenční snímací kalorimetrie (DSC), Část 1: Základní principy, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [46] PHAM THI THU THU. *Bakalářská práce – Možnosti recyklace směsi termoplastických polymerů* Zlín: UTB, 2008. 39 s. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6589/thuy%20pham%20thi%20thu_2008_bp.pdf?sequence=1

Seznam použitých symbolů a zkratk

HALS	Hindered Amine Light Stabilizers
HDPE	Vysoce hustotní polyetylen
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
PE	Polyetylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
RH	Retardéry hoření
TKO	Tuhé komunální odpady
WPC	Wood Plastic Composite
ZSK	Zwei Schnecken Knetter

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma rozdělení přísad používaných u WPC	18
Obrázek 2 - Schematický diagram postupu výroby WPC [1]	23
Obrázek 3 - Rozdělení jednotlivých používaných extrudérů [1]	24
Obrázek 4 - Schéma jednošnekového a protiběžného dvoušnekového extrudéru [1]....	25
Obrázek 5 - Schéma dvoušnekového extrudéru [1]	26
Obrázek 6 - Schéma <i>In-line</i> výrobní linky pro vstřikování [1].	28
Obrázek 7 - Vstřikované vzorky primárního HDPE [34].....	35
Obrázek 8 – Vzhled zkušebních těles WPC s primárním HDPE [19].	35
Obrázek 9 - Nasákavost kompozitů ponořených do vody po 24 hodinách [34]	41
Obrázek 10 - Vliv modifikátoru rázové houževnatosti (EVA) [20]	42
Obrázek 11 - Zkušební vzorky vyrobené vstřikováním	46
Obrázek 12 – Trhací stroj	47
Obrázek 13 – Upnutí zkušební vzorku	47
Obrázek 14 - Schéma znázorňující základní principy DSC s tepelným tokem; [45].....	48
Obrázek 15 - Grafické znázornění vlivu primárního a odpadního polymeru na pevnosti v tahu	51
Obrázek 16 - Průběh pevností v tahu jednotlivých vzorků WPC IV	51
Obrázek 17 - Průběh pevností v tahu jednotlivých vzorků u primárního PP	52
Obrázek 18 - Průběh pevností v tahu jednotlivých vzorků u recyklovaného PP.....	52
Obrázek 19 - Vyhodnocení teplot tání u primárního PP, recyklovaného PP a WPC IV.	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Charakteristické vlastnosti polyetylenu [35].....	13
Tabulka 2 - Charakteristické vlastnosti ionomeru [35]	14
Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti polypropylenu [35]	15
Tabulka 4 - Vlastnosti a parametry dřevitá moučky určené k výrobě WPC [37]	17
Tabulka 5 - Hodnoty bodu tání používaných polymerních matric [2]	32
Tabulka 6 - Mísitelnost mezi polymery.....	33
Tabulka 7 - Charakteristické vlastnosti primárního polypropylenu.....	43
Tabulka 8 - Charakteristické vlastnosti dřevité moučky	44
Tabulka 9 - Složení vstupních surovin	46
Tabulka 10 - Naměřené průměrné hodnoty pevností v tahu, prodloužení	49
Tabulka 11 - Naměřené hodnoty ITT primárního a recyklovaného PP	49
Tabulka 12 – Teploty tání termoplastické matrice.....	50
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty z referenčního polymeru (primární polypropylen)	64
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty z recyklovaného PP	64
Tabulka 15 - Naměřené hodnoty z WPC I.....	64
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty z WPC II	65
Tabulka 17 - Naměřené hodnoty z WPC III.....	65
Tabulka 18 - Naměřené hodnoty z WPC IV.....	65

Přílohy

- Pevnost v tahu

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty z referenčního polymeru (primární polypropylen)

	Naměřené a vypočtené hodnoty							
	h [mm]	b [mm]	F [KN]	A _M [%]	Průměr. A _M [%]	E [MPa]	R _M [MPa]	Průměr. R _M [MPa]
1	10	4	1,018	12,60	12,70	1350	25,46	25,71
2			1,037	13,01		1400	25,91	
3			1,030	12,54		1300	25,76	
4			0,994	12,73		1330	24,85	
5			1,062	12,68		1400	26,54	
6			1,031	12,65		1470	25,77	

A_M – prodloužení na mezi pevnosti; E – modul pružnosti; R_M – pevnost v tahu

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty z recyklovaného PP

	Naměřené a vypočtené hodnoty							
	h [mm]	b [mm]	F [KN]	A _M [%]	Průměr. A _M [%]	E [MPa]	R _M [MPa]	Průměr. R _M [MPa]
1	10	4	1,022	13,31	13,07	1380	25,54	25,00
2			0,994	13,02		1350	24,85	
3			0,994	12,77		1340	24,84	
4			0,986	13,05		1340	24,64	
5			1,004	13,22		1190	25,09	
6			1,001	13,07		1360	25,01	

A_M – prodloužení na mezi pevnosti; E – modul pružnosti; R_M – pevnost v tahu

Tabulka 15 - Naměřené hodnoty z WPC I

	Naměřené a vypočtené hodnoty							
	h [mm]	h [mm]	F [KN]	A _M [%]	Průměr. A [%]	E [MPa]	R _M [MPa]	Průměr. R _M [MPa]
1	10	4	0,847	2,74	3,33	3370	21,18	21,57
2			0,888	3,54		3190	22,20	
3			0,872	3,69		2780	21,80	
4			0,833	2,91		2880	20,83	
5			0,866	3,64		2960	21,64	
6			0,870	3,46		3180	21,76	

A_M – prodloužení na mezi pevnosti; E – modul pružnosti; R_M – pevnost v tahu

Tabulka 16 - Naměřené hodnoty z WPC II

	Naměřené a vypočtené hodnoty							
	h [m m]	h [mm]	F [KN]	A _M [%]	Průměr. A [%]	E [MPa]	R _M [MPa]	Průměr. R _M [MPa]
1	10	4	0,915	3,79	3,75	3150	22,88	21,75
2			0,906	3,69		3130	22,66	
3			0,845	3,69		2980	21,11	
4			0,859	4,68		1610	21,49	
5			0,845	3,72		3110	21,12	
6			0,851	2,91		3310	21,25	

A_M – prodloužení na mezi pevnosti; E – modul pružnosti; R_M – pevnost v tahu

Tabulka 17 - Naměřené hodnoty z WPC III

	Naměřené a vypočtené hodnoty							
	h [mm]	h [mm]	F [KN]	A _M [%]	Průměr. A [%]	E [MPa]	R _M [MPa]	Průměr. R _M [MPa]
1	10	4	0,829	2,98	3,00	3750	20,73	20,65
2			0,825	3,11		3230	20,61	
3			0,833	2,79		3140	20,83	
4			0,844	3,05		3300	21,09	
5			0,823	3,33		3200	20,58	
6			0,802	2,71		3340	20,05	

A_M – prodloužení na mezi pevnosti; E – modul pružnosti; R_M – pevnost v tahu

Tabulka 18 - Naměřené hodnoty z WPC IV

	Naměřené a vypočtené hodnoty							
	h [mm]	h [mm]	F [KN]	A _M [%]	Průměr. A [%]	E [MPa]	R _M [MPa]	Průměr. R _M [MPa]
1	10	4	0,905	3,87	3,18	3180	22,61	22,71
2			0,861	3,38		3200	21,51	
3			0,855	3,01		3470	21,39	
4			0,908	3,84		3250	22,70	
5			0,839	2,38		3690	20,98	
6			0,844	2,58		3670	21,09	

A_M – prodloužení na mezi pevnosti; E – modul pružnosti; R_M – pevnost v tahu